B V PASYNKOV P K CHIRKIN DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE &Λ Pct SEMICONDUCTOR DISPOZITIVE la G! R ro 's G" L ιιιφ eu" De ce diferența de potențial care există într-un semiconductor cu o distribuție neuniformă a impurităților nu poate fi măsurată cu un voltmetru? • con q (p con \u d , V H) = , V (')- \A a=consi > la T De ce diferența de potențial de contact existentă la joncțiunea p-η nu poate fi măsurată cu un voltmetru? V V PASYNKOV L K CHIRKIN DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE Ediția a patra, revizuită și mărită Aprobat de Ministerul Învățământului Superior și Secundar de Specialitate al URSS ca manual pentru studenții care studiază la specialitățile "Semiconductori și dielectrici" și "Dispozitive semiconductoare și microelectronice" Moscova "Liceu" BBK P UDC Referent - Departamentul "Dispozitive semiconductoare" al Institutului de Inginerie Radio, Electronică și Automatizare din Moscova (Șeful Departamentului Profesor asociat N V Korotkova) Pasynkov V V , Chirkin L K P Dispozitive semiconductoare: manual, pentru universități pe special "Semiconductoare și dielectrice" și "Dispozitive semiconductoare și microelectronice" - ed a IV-a, revizuită si suplimentare - M : Şcoala superioară, - p bolnav Cartea discută despre procesele fizice din dispozitivele semiconductoare și elementele circuitelor integrate, proprietățile de bază, caracteristicile și parametrii acestora, designul și caracteristicile tehnologice ale dispozitivelor semiconductoare în proiectarea integrată și principiile generale ale microelectronicii Ediția a -a (a -a -) a revizuit materialul legat de diode, tiristoare și alte dispozitive - ( )- - BBK FO (c) Editura "Școala Superioară", (c) Editura "Școala superioară", , cu modificări CUVÂNT ÎNAINTE Un inginer de inginerie electronică la specialitățile "Semiconductori și dielectrici" și "Dispozitive semiconductoare și microelectronice" trebuie să fie specialist în proiectarea, construcția, tehnologia și aplicarea dispozitivelor și dispozitivelor bazate pe diverse procese fizice în stare solidă Fără cunoașterea principiului de funcționare și a proprietăților unui anumit dispozitiv semiconductor, este imposibil să efectuați corect calculul, să dezvoltați o tehnologie de fabricație și să organizați producția, să investigați proprietățile și să măsurați parametrii acestui dispozitiv, precum și să utilizați rațional acest dispozitiv într-un anumit circuit, într-o anumită instalație în diferite condiții de funcționare În consecință, fără o asimilare solidă a fizicii dispozitivelor semiconductoare și a elementelor circuitelor integrate, este imposibil de înțeles și asimilat chiar și prevederile de bază ale aproape tuturor disciplinelor speciale pe care elevii le vor studia în conformitate cu programele de învățământ după disciplinele "Dispozitive semiconductoare și microelectronică", "Dispozitive electronice și microelectronice", "Dispozitive fizice semiconductoare", "Dispozitive electronice și semiconductoare", etc Cartea poate fi folosită nu numai ca manual pentru specialitățile remarcate, ci și ca ajutor didactic pentru studenții altor specialități de inginerie electronică Prin urmare, în cap Cartea oferă informații de bază despre fizica semiconductoarelor în cantitatea minimă necesară pentru a înțelege principiul de funcționare și proprietățile diferitelor dispozitive semiconductoare și elemente de circuit integrat Înainte de a studia dispozitivele semiconductoare, ar trebui să vă familiarizați cu notarea mărimilor fizice adoptate în carte Principiul de funcționare al majorității dispozitivelor semiconductoare se bazează pe utilizarea diferitelor proprietăți de redresare a joncțiunilor electrice Prin urmare, pentru o înțelegere profundă a proprietăților și caracteristicilor diferitelor dispozitive semiconductoare, este necesar

să stăpâniți materialul Ch , dedicat fenomenelor de contact, iar cap , unde sunt luate în considerare diodele semiconductoare, a căror structură este mai simplă decât structurile majorității celorlalte dispozitive Când se iau în considerare tipuri specifice de semiconductori Ar trebui să se acorde atenție conexiunii proprietăților și caracteristicilor lor cu modele generale studiate anterior Cartea a fost compilată pe baza experienței de prelegere a autorilor și a colegilor lor de la Departamentul de Dielectrice și Semiconductori al Ordinului Leningrad al lui Lenin și al Ordinului Revoluției din octombrie al Institutului Electrotehnic V I Ulyanov (Lenin) Autorii au fost foarte ajutați de comentariile recenzenților primelor trei ediții ale manualului, laureat al Premiului Lenin prof Ya A Fedotova, prof K V Shalimova, membru corespondent Academia de Științe a BSSR V A Labunov și angajații acestora La pregătirea manualului au contribuit și profesori de la multe universități din URSS, care, deși și-au îmbunătățit abilitățile la Departamentul de Dielectrice și Semiconductori din LETI, au luat parte la discuția asupra diferitelor probleme ale fizicii dispozitivelor semiconductoare și a metodelor de prezentarea lor Ne exprimăm recunoștința profundă profesorilor Departamentului de Dispozitive Semiconductoare a Institutului de Inginerie Radio, Electronică și Automatizare din Moscova, condus de Conf univ N V Korotkova, pentru comentariile valoroase făcute în timpul revizuirii manuscrisului ediției a patra a manualului Autorii INTRODUCERE Direcțiile principale pentru dezvoltarea economică și socială a URSS pentru anii - și pentru perioada până în anul au stabilit sarcina de a asigura creșterea progresivă a economiei, creșterea constantă a eficienței producției pe baza intensificării sale cuprinzătoare , și asigurând accelerarea în continuare a progresului științific și tehnologic Progresul științific și tehnologic este de neconceput fără electronică Dezvoltarea intensivă a electronicii este asociată cu apariția unor dispozitive semiconductoare noi și diverse și a circuitelor integrate, care sunt utilizate pe scară largă în tehnologia computerelor, automatizări, inginerie radio și televiziune, în echipamente de măsurare, medicină, biologie etc În primele instalații electronice au fost folosite dispozitive semiconductoare sub formă de diode punctiforme sau, așa cum se numeau înainte, detectoare cu cristale Proprietățile de rectificare ale contactelor dintre metale și anumiți compuși ai sulfului au fost descoperite în În , A S Popov, la inventarea radioului, a folosit un coerer de pulbere, în care au fost utilizate proprietățile neliniare ale sistemelor granulare În , O V Losev a folosit rezistența diferențială negativă, care apare în anumite condiții la contactele punctuale ale unui metal cu un semiconductor, pentru a genera și a amplifica oscilații electromagnetice de înaltă frecvență În plus, el a descoperit strălucirea cristalelor de carbură de siliciu atunci când un curent trece printr-un punct de contact Cu toate acestea, în această perioadă, tehnica dispozitivelor electrovacuum s-a dezvoltat cu succes și, din cauza cunoașterii insuficiente a structurii semiconductoarelor și a proceselor electrofizice care au loc în ele, dispozitivele semiconductoare nu au primit o dezvoltare și aplicare semnificativă la acel moment În timpul Marelui Război Patriotic, au fost dezvoltate diode de germaniu și siliciu de înaltă frecvență și superînaltă frecvență În , URSS a început producția de generatoare termoelectrice semiconductoare pentru conversia directă a energiei termice în energie electrică Generatoarele termice erau folosite pentru alimentarea stațiilor radio portabile ale detașamentelor partizane Crearea şi

producerea acestora şi multe alte dispozitive au devenit posibile datorită studiilor teoretice și experimentale fundamentale ale proprietăților semiconductorilor, efectuate de un grup de oameni de știință condus de academicianul A F Ioffe Din , adică de la crearea unui tranzistor punctual de către oamenii de știință americani J Bardeen, W Brattain și W Shockley, a început o nouă etapă în dezvoltarea electronicii semiconductoare În anii au fost dezvoltate diverse tipuri de tranzistoare bipolare, tiristoare, diode redresoare puternice cu germaniu și siliciu, fotodiode, fototranzistoare, fotocelule din siliciu, diode tunel etc Principiul de funcționare al tranzistoarelor cu efect de câmp cu poartă izolată a fost propus încă din anii ai secolului nostru, dar înainte de dezvoltarea finală a acestor tranzistoare, mulți ani de cercetare în procesele electrofizice la interfața unui semiconductor cu un dielectric și era necesară tehnologia structurilor necesare În anii ai secolului nostru începe producția de circuite integrate În același timp, a fost posibilă reducerea semnificativă a costurilor și creșterea fiabilității dispozitivelor electronice semiconductoare, reducerea semnificativă a greutății și dimensiunilor lor totale prin formarea tuturor elementelor pasive și active ale circuitelor integrate într-un singur proces tehnologic, precum și a unui rezultat al integrării constructive Etapa actuală de dezvoltare a electronicii semiconductoare în țara noastră se caracterizează printr-o cantitate mare de cercetare și muncă tehnologică care vizează îmbunătățirea în continuare a dispozitivelor semiconductoare existente și crearea de noi circuite integrate capitol Informații de bază despre fizica semiconductorilor § BANDE ENERGETICE ALE SEMICONDUCTORILOR Fiecare electron care alcătuiește un atom are o anumită energie totală sau ocupă un anumit nivel de energie Într-un corp solid, datorită interacțiunii atomilor, nivelurile de energie sunt împărțite și formează zone de energie, constând din niveluri individuale distanțate în energie, al căror număr corespunde numărului de atomi omogene dintr-un corp cristalin dat (Fig) O bandă de energie sau o colecție de mai multe benzi de energie suprapuse care s-au format ca urmare a divizării unuia sau mai multor niveluri de energie ale unui atom individual se numește bandă permisă Electronii dintr-un solid pot avea energii corespunzătoare benzii permise Nivelul de energie superior al zonei permise se numește plafon, iar nivelul inferior de energie se numește partea de jos Nivelurile de energie ale electronilor de valență la divizarea formează o bandă de valență Nivelurile de energie permise libere de electroni în starea neexcitată a atomului, divizându-se, formează una sau mai multe zone libere Cea mai joasă dintre benzile libere se numește bandă de conducție De cel mai mare interes sunt benzile de valență și conducție, deoarece proprietățile electrice, optice și alte proprietăți ale solidelor depind de aranjarea lor reciprocă și de gradul de umplere a acestora cu electroni Între benzile permise există intervale de bandă, adică intervalul de valori ale energiei, pe care electronii dintr-un cristal ideal nu le pot poseda Pentru semiconductori (conform celor spuse), banda interzisă care separă banda de valență și banda de conducere este de cea mai mare importanță Se caracterizează prin intervalul de bandă Δ , adică diferența de energie dintre partea inferioară a benzii de conducere și partea superioară a benzii de valență La o temperatură de K, siliciul are o bandă interzisă Δ = , eV; pentru germaniu Δ = , eV; pentru arseniura de galiu Δ = , eV; pentru carbură de siliciu Δ = , ¿- , eV (pentru diferite politipuri) Orez Diagrama energetică a unui semiconductor în prezența unui câmp electric de putere E în el și a

unei diferențe de potențial între punctele și egală cu φι Orez Benzile de energie ale unui semiconductor: , , , - zone permise, - zone interzise; , - zone libere; - banda de conducere; - banda de valenta; Δ este banda interzisă Intervalul de bandă se modifică odată cu temperatura Aceasta se întâmplă ca urmare a:) modificări ale amplitudinii vibrațiilor termice ale atomilor rețelei cristaline;) modificări ale distanțelor interatomice, adică volumul corpului Odată cu creșterea temperaturii, în primul caz, band-gap-ul scade; în al doilea caz, poate exista atât o scădere, cât și o creștere a band-gap-ului Pentru majoritatea semiconductorilor, banda interzisă scade odată cu creșterea temperaturii Dacă există un câmp electric în semiconductor, este recomandabil să construiți diagrame de energie prin reprezentarea grafică a energiei totale a electronilor E - qy de-a lungul axei verticale (ținând cont de energia potențială a electronului în câmpul electric) și de-a lungul axa orizontală - coordonata geometrică (fig) Cu această construcție de diagrame energetice în zonele în care există un câmp electric, nivelurile și zonele de energie sunt oblice, iar panta este proporțională cu intensitatea câmpului electric, ținând cont de scările acceptate de-a lungul axelor și deplasarea relativă a nivelurilor sau zonelor de energie corespunzătoare - diferența de potențial dintre punctele date ale volumului semiconductorului Coeficientul de proporționalitate în acest caz este egal cu sarcina elementară a electronului q\ unei creșteri a potențialului corespunde unei scăderi a nivelurilor sau zonelor de energie din diagrama energetică § GENERAREA ȘI RECOMBINAREA PURTĂTORILOR DE CHARGE Formarea electronilor liberi și a găurilor - generarea purtătorilor de sarcină - are loc sub influența mișcării haotice termice a atomilor rețelei cristaline (generare termică), sub influența cuantelor de lumină absorbite de semiconductor (generarea luminii) și a altor energii factori Deoarece un semiconductor se află întotdeauna sub acțiunea tuturor acestor factori sau a cel puțin unul (T F), generarea purtătorului are loc continuu Concomitent cu generarea într-un semiconductor, are loc și procesul invers - recombinarea purtătorilor de sarcină, adică întoarcerea electronilor din banda de conducție în banda de valență, în urma căreia o pereche de purtători de sarcină dispare În starea de echilibru termodinamic, procesele de generare și recombinare a purtătorilor de sarcină sunt echilibrate reciproc În acest caz, în semiconductor, există concentrații de echilibru de electroni po și găuri po Atunci când un semiconductor este expus unui factor de energie externă netermic (lumină, câmp electric puternic etc), datorită generării de noi purtători de sarcină, concentrația lor pir (concentrația de neechilibru) va depăși concentrația de echilibru cu Δη (sau Δρ), care se numește concentrație în exces Prin urmare, Δη = n - po; Δρ = p - po (,) O concentrare excesivă a purtătorilor de sarcină poate apărea în anumite zone ale structurii dispozitivului semiconductor nu numai ca urmare a influențelor energetice externe, ci și datorită diferitelor procese (injecție, extracție, acumulare etc) care pot apărea în dispozitivele semiconductoare (care vor fi discutate mai jos)) Mecanismele de recombinare pot fi diferite (Fig) Recombinarea interbandă, sau directă, are loc atunci când un electron liber trece de la banda de conducție la banda de valență la unul dintre nivelurile de energie liberă, ceea ce corespunde cu dispariția unei perechi de purtători de sarcină - un electron liber și o gaură Cu toate acestea, un astfel de proces de recombinare interbandă este puțin probabil, deoarece un electron liber și o gaură ar trebui să fie simultan în

același loc în cristal talla În plus, legea conservării impulsului trebuie îndeplinită, adică recombinarea unui electron și a unei găuri este posibilă numai pentru momente identice, dar direcționate în mod opus, ale electronului și găurii Prin urmare, de exemplu, în germaniu, are loc doar o recombinare la mii ca urmare a recombinării interbande hv hv A) Orez Diferite mecanisme de generare și recombinare a purtătorilor de sarcină: (a) generarea și recombinarea interbandă; b - generarea și recombinarea cu participarea capcanelor de recombinare goale; c - generarea și recombinarea cu participarea capcanelor de recombinare umplute cu electroni; - simbolul generației; - - - - simbol al recombinării Numerele indică etapele proceselor de generare și recombinare Recombinarea care implică capcane de recombinare are loc în două etape În prima etapă, capcana de recombinare (sau nivelul de energie al capcanei de recombinare) captează, de exemplu, un electron din banda de conducție Astfel, electronul iese din procesul de conducere electrică Capcana va rămâne în această stare până când o gaură se apropie de ea sau, cu alte cuvinte, până când un nivel de energie liberă al benzii de valență apare într-un loc dat în cristal Când sunt îndeplinite aceste condiții, are loc a doua etapă a recombinării: electronul trece la nivelul liber al benzii de valență (ceea ce echivalează cu captarea unei găuri din banda de valență de către o capcană încărcată negativ) Un proces de recombinare în două etape este mai probabil, deoarece nu necesită prezența simultană a unui electron liber și a unei găuri la un loc dat al cristalului Capcana de recombinare detectează cantitatea de mișcare necesară pentru a respecta legea conservării impulsului și poate prelua o parte din energia eliberată în timpul procesului de recombinare Rolul capcanelor de recombinare poate fi jucat de atomi sau ioni de impurități, diverse incluziuni într-un cristal, locuri neumplute ale rețelei cristaline, fisuri și alte imperfecțiuni de volum sau de suprafață Datorită faptului că există mult mai multe dintre aceste defecte pe suprafața cristalului decât în vrac, procesul de recombinare la suprafață ar trebui să decurgă mult mai intens De obicei, este luat în considerare și evaluat separat, numărând peste Yu recombinare ionică, un fel de recombinare care implică capcane de recombinare În funcție de modul în care energia eliberată în timpul recombinării unui electron și a unei găuri este cheltuită, recombinarea poate fi împărțită în două tipuri Recombinarea radiativă se numește recombinare, în care energia eliberată atunci când un electron trece la un nivel de energie mai scăzut este emisă sub forma unui cuantum de lumină (foton) În timpul recombinării neradiative (fonon), excesul de energie electrică este transferat în rețeaua cristalină a semiconductorului, adică excesul de energie se duce la formarea fononilor - cuante de energie termică § CONCENTRAREA PURTĂTORILOR ÎNTR-UN SEMICONDUCTOR LA ECHILIBRI TERMODINAMIC În conformitate cu statisticile Fermi-Dierek, probabilitatea de a umple un nivel de energie cu un electron este determinată de energia E corespunzătoare acestui nivel și de temperatura absolută T\ Rp(E) i I E - Efes I+expt^ (,) unde Ef este energia nivelului Fermi, probabilitatea de umplere care este egală cu / și față de care curba de probabilitate este simetrică (Fig) Energia nivelului Fermi corespunde limitei superioare a electricului distribuția la temperatura Γ = , precum și energia medie a "intervalului de frotiu" la orice altă temperatură (Fig) Simetria curbei probabilității de umplere față de nivelul Fermi înseamnă aceeași probabilitate de a umple nivelul cu un electron cu o energie mai mare cu valoarea E - Ef și probabilitatea ca nivelul să fie eliberat de un

electron cu o energie care este cu aceeași cantitate mai mică decât energia nivelului Fermi Relațiile ( ) pot fi folosite pentru a determina ocuparea benzilor de conducție sau de valență ale unui semiconductor de către electroni Dar pentru banda de valență este mai convenabil să spui Orez Distribuția electronilor într-o zonă parțial umplută (a) și funcția probabilității de umplere a nivelurilor de energie ( ) vorbiți despre găuri - niveluri de energie goale în banda de valență Orice nivel de energie poate fi fie ocupat de un electron, fie liber de un electron Prin urmare, suma probabilităților acestor două evenimente ar trebui să fie egală cu unu: Pp(E) + + Pp(E) = Apoi probabilitatea de a umple nivelul de energie cu o gaură PP(E) = (-) Nivelul Fermi este de obicei situat în banda interzisă a diagramei energetice relativ departe (în unități de energie) de banda de conducție și de banda de valență față de energia kT (la temperatura camerei kT " , eV), adică |E - Ef I " kT (,) Prin urmare, neglijând unitatea în numitorul ( ), este probabil ca distribuția electronilor pe nivelurile de energie ale benzii η ' K f i ¿ - - -Ofi - , , ,zV Orez Probabilitatea de a umple nivelurile de energie cu electroni la diferite temperaturi: conform statisticilor Fermi-Dirac; - conform statisticilor Maxwell-Boltzmann pentru electroni în banda de conducție / în banda de valență conductivitatea este determinată folosind statisticile Maxwell-Boltzmann: RP(E) " exp(- - (-) În mod similar, găsim probabilitatea distribuției găurilor peste nivelurile de energie ale benzii de valență, ținând cont ( ) și ( ): RR(E) "expAzzÆ (-) Astfel, pentru majoritatea semiconductorilor (nedegenerați) este posibil să se utilizeze statistica Maxwell-Boltzmann, iar doar în unele cazuri pentru semiconductori (degenerați) este necesară utilizarea statisticii Fermi-Dirac Diferența dintre aceste două funcții de distribuție a energiei electronice este prezentată în fig Pentru a determina densitatea de electroni într-un semiconductor nedegenerat, trebuie să integrăm peste energie produsul funcției de distribuție dublată a densității nivelurilor de energie în banda de conducție [A(E)] și probabilitatea de a umple aceste niveluri cu electroni ( )) Integrarea trebuie efectuată de la energia de jos la energia de sus a benzii de conducere Dacă luăm în considerare probabilitatea neglijabil de mică de a umple nivelurile cu electroni în apropierea vârfului benzii de conducție, atunci putem limita de integrare este considerată a fi egală cu infinitul, adică oo " = ^N( )-Pn( )d es Ca rezultat al integrării, obținem po = YVsexp(- (,) unde NC este densitatea efectivă a stărilor din banda de conducere; Ac este densitatea efectivă a nivelurilor de energie din banda de conducție a cărei energie este adusă la partea de jos a benzii de conducție Densitatea efectivă a stărilor diferă cu un factor de doi de densitatea efectivă a nivelurilor datorită faptului că fiecare nivel de energie poate conține doi electroni cu spini diferiți (după principiul Pauli) În mod similar, concentrația de echilibru a găurilor în orice semiconductor nedegenerat la echilibru termodinamic ro = YVexp , (,) unde Av este densitatea efectivă a nivelurilor de energie din banda de valență, a cărei energie este redusă la vârful benzii de valență; Ev este energia vârfului benzii de valență Astfel, concentrația de echilibru a purtătorilor de sarcină este determinată de densitatea efectivă a nivelului în banda corespunzătoare, de temperatură și de poziția nivelului Fermi față de partea inferioară a benzii de conducție sau vârful benzii de valență § PROPRII SEMICONDUCTORI Un semiconductor intrinsec este un semiconductor fără impurități donor și acceptor sau cu o concentrație de impurități atât de scăzută încât nu afectează semnificativ conductivitatea

semiconductorului Nu există purtători de sarcină într-un semiconductor intrinsec la o temperatură de zero absolut, deoarece banda de valență este complet ocupată de electroni (nu există găuri) și nu există electroni în banda de conducție La temperaturi peste zero absolut, unii electroni ai benzii de valență pot fi transferați în banda de conducție - este posibilă generarea termică de perechi de purtători de sarcină, electronii liberi apar în banda de conducție, iar găurile apar în banda de valență Procesul de generare termică este posibil chiar și la temperaturi foarte scăzute datorită fluctuațiilor (abaterilor) semnificative ale energiilor vibrațiilor termice ale atomilor față de energia medie a vibrațiilor termice ale atomilor față de nodurile rețelei cristaline După cum sa menționat, pe lângă generarea termică a purtătorilor de sarcină într-un semiconductor, există și recombinarea acestora, iar aceste procese sunt echilibrate reciproc la orice temperatură În acest caz, în semiconductorul intrinsec, există o concentrație intrinsecă de electroni, care poate fi exprimată printr-o relație similară cu ( ): n, = / LTsV exp(- Es- Țr^-) " Afcexp(- ( ) Formula pentru concentrația intrinsecă a găurilor este similară cu ( ): p, = / ЛШexp Ev ~y- " Vvehr b-~¿* (■) Densitățile efective de nivel în banda de conducție și în banda de valență sunt determinate de relații D' = d, = >A^>Vg) Odată cu creșterea concentrației de impurități, porțiunile curbelor corespunzătoare conductivității electrice a impurităților se deplasează în sus, adică, se obține o concentrație mai mare de purtători de sarcină la temperaturile conductivității electrice a impurităților Panta primei secțiuni a curbei (secțiunea de ionizare a impurităților) scade odată cu creșterea concentrației de impurități, deoarece odată cu creșterea concentrației de impurități, datorită interacțiunii atomilor de impurități, nivelurile de energie ale impurităților se împart, iar energia de ionizare a impurităților scade Prin urmare, AED>AEd>AZ" La o concentrație suficient de mare de impurități (N"), energia de ionizare a impurităților tinde spre zero, deoarece banda de impurități formată se suprapune cu banda de conducție Un astfel de semiconductor este degenerat (semimetal) Temperatura corespunzătoare trecerii de la conductivitatea electrică a impurităților la conductivitatea intrinsecă crește odată cu creșterea concentrației de impurități (de exemplu, T' > T) Aceasta înseamnă că temperatura maximă de funcționare a unui dispozitiv semiconductor bazat pe un semiconductor cu o concentrație mai mare de impurități va fi, de asemenea, puțin mai mare decât temperatura maximă de funcționare a aceluiași dispozitiv din același material, dar cu o concentrație mai mică de impurități § TEMPERATURA DEPENDENȚELE MOBILITĂȚII PORTATORILOR DE ÎNCĂRCĂRI ȘI CONDUCTIVITATEA SPECIFĂ Mobilitatea purtătorilor de sarcină este afectată în principal de doi factori fizici: vibrațiile termice haotice ale atomilor rețelei cristaline (împrăștierea purtătorilor de sarcină pe vibrațiile termice ale atomilor rețelei cristaline) și câmpurile electrice ale impurităților ionizate (împrăștierea ionilor de impurități) La temperaturi ridicate predomină împrăștierea purtătorilor de sarcină prin vibrațiile termice ale atomilor rețelei cristaline Prin urmare, odată cu creșterea temperaturii în acest interval de temperatură, mobilitatea purtătorilor scade (Fig) În domeniul temperaturilor scăzute, cu scăderea temperaturii, vitezele termice ale mișcării haotice a purtătorilor de sarcină scad, ceea ce duce la o creștere a timpului de rezidență al purtătorului în apropierea ionului de impurități, adică a duratei acțiunii electricului câmpul ionului de impuritate pe purtătorul de sarcină crește Prin urmare, în intervalul

temperaturilor scăzute, pe măsură ce temperatura scade, mobilitatea purtătorilor scade și ea (Fig) Odată cu creșterea concentrației de impurități, crește și împrăștierea prin ionii de impurități, adică mobilitatea purtătorilor de sarcină scade Cu toate acestea, în intervalul de temperaturi ridicate, h "µ Astfel, într-un semiconductor (arseniura de galiu) pot exista electroni liberi cu mobilități diferite: electroni "uşori" cu masă efectivă scăzută și mobilitate mare în valea centrală și electroni "grei" cu masă efectivă mare și mobilitate redusă în văile laterale În câmpurile electrice slabe, aproape toți electronii liberi au viteze mici de deriva și cvasi-momente și, prin urmare, treizeci mu sunt situate în valea centrală În câmpurile electrice puternice, electronii liberi, dobândind energie suplimentară ce depășește Δ ι, sunt capabili să treacă în văile laterale Acolo se caracterizează printr-o masă eficientă mai mare (devin "grele") și o mobilitate scăzută Din acest motiv, mobilitatea medie a tuturor electronilor liberi scade odată cu creșterea intensității câmpului electric Mobilitatea electronilor "uşoare" şi "grei" poate diferi de zeci de ori § Proprietățile optice ale semiconductorilor absorbția luminii Există diferite tipuri de absorbție a luminii Când cuantele de lumină - fotonii - sunt absorbite de un semiconductor, energia lor poate fi transferată electronilor din banda de valență cu transferul acestor electroni în banda de conducție, adică energia cuantelor de lumină este folosită pentru a ioniza atomii semiconductori Acest proces se numește absorbție intrinsecă Există o absorbție a energiei cuantelor luminoase de către electronii liberi ai benzii de conducție sau găurile benzii de valență, adică absorbția de către purtătorii de sarcină În acest caz, energia cuantelor de lumină este cheltuită și pentru a transfera purtători la niveluri de energie mai înalte pentru ei, dar în zona permisă corespunzătoare Este posibilă absorbția de impurități, în care energia fotonului merge la ionizarea sau excitarea atomilor de impurități În plus, în semiconductori pot apărea absorbția fotonilor de către rețeaua cristalină și alte tipuri de absorbție Procesele de absorbție a fotonului nu trebuie confundate cu procesele de împrăștiere, care conduc și la o scădere a densității fluxului fotonic Orez Tranziția directă a unui electron de la banda de valență la banda de conducție a unui semiconductor Orez Tranziția indirectă a unui electron de la banda de valență la banda de conducere a unui semiconductor Odată cu absorbția intrinsecă a fotonilor, tranziția electronilor de la banda de valență la banda de conducere a unui semiconductor poate avea loc fără modificarea cvasi-momentului sau vectorului de undă al electronului, adică sunt posibile tranziții directe (Fig) Poate exista și un transfer de electroni din banda de valență în banda de conducție și, odată cu modificarea vectorului de undă, tranziții indirecte (Fig) În cazul tranzițiilor indirecte, pe lângă foton și electron, o a treia cvasiparticulă trebuie să participe și la procesul de absorbție, care va prelua o parte din cvasimomentum asupra ei însuși, adică să asigure îndeplinirea legii conservării impulsului Astfel, tranzițiile indirecte sunt tranziții care implică o a treia cvasiparticulă A treia cvasiparticulă este de obicei un fonon - un cuantum de energie termică a rețelei cristaline a unui semiconductor ¿ Fr/e dx " F ~FF /A Orez Absorbția luminii într-un semiconductor Absorbția luminii sau a fotonilor în general este caracterizată de indicele de absorbție a, care este egal cu modificarea relativă a fluxului luminos (fluxul fotonic) într-un strat semiconductor de grosime unitară (Fig): Această relație este o ecuație diferențială cu variabile separabile De aceea (D X C C g "F/h a \ax; n-^-=-ax și Φ =

exp(-ax) Fo θ() Astfel, indicele de absorbție a poate fi definit ca reciproca grosimii stratului semiconductor, după trecerea prin care fluxul luminos (fluxul fotonic) va scădea cu un factor de e = , ori Dependența indicelui de absorbție de energia fotonilor se numește spectrul de absorbție al unui semiconductor (Fig) La energii fotonice mari, auto-absorbția are loc odată cu formarea de perechi de purtători de electroni-gauri În acest caz, rata de absorbție este mare La energie redusă foto- nou (mai puțin decât banda interzisă a semiconductorului), coeficientul de absorbție scade La energii fotonice chiar mai mici, absorbția impurităților poate avea loc dacă nu toate impuritățile sunt ionizate la o anumită temperatură Absorbția de impurități corespunde unuia sau mai multor maxime din spectrul de absorbție N" N N N); c, e- tensiune inversă externă (U dp kT dx dx Ψκοη U Pn, rp sau -wsd(₽=- s o Pp qdy dn fkon " kT dx n dx SAU dn n P La curenți scăzuti, concentrațiile purtătorilor majoritari în afara joncțiunii p-n pp și pp sunt practic egale cu concentrațiile de echilibru Ppo și pp Apoi, ținând cont de ( ) pn, rp = Ppoexp-^; pr, gr = pr exp (,) Relaţiile obţinute au un sens fizic destul de simplu Într-un semiconductor nedegenerat, purtătorii de sarcină se supun statisticilor Maxwell-Boltzmann, adică numărul lor cu o energie peste o anumită valoare scade exponențial odată cu creșterea acestei energii Într-o stare de echilibru de concentrare Concentrația purtătorilor minoritari de sarcină pe o parte a joncțiunii p-n este egală cu concentrația purtătorilor majoritari de pe cealaltă parte a joncțiunii p-n, care au o energie mai mare cu ^φK H Când înălțimea barierei de potențial se modifică cu qu, numărul de purtători cu energie suficientă pentru a o depăși se modifică cu un factor de exp-|^- ori, care se caracterizează prin formulele ( ) Când tensiunea la joncțiunea pn este egală cu zero, concentrația la limită a purtătorilor de sarcină minoritari este egală cu cea de echilibru Odată cu creșterea tensiunii directe (u >), crește concentrația la limită a purtătorilor de sarcină minoritari, ceea ce corespunde fenomenului de injecție Cu tensiune inversă (u gr max-(,) Relațiile ( ) pot fi considerate drept limite superioare ale concentrației de purtători injectați prin joncțiunea p-n Curenți mari inversați Relațiile ( ) arată că concentrația purtătorilor de sarcină minoritari la limita joncțiunii p-n cu deplasare inversă ar trebui să scadă foarte rapid cu o creștere a valorii absolute a tensiunii inverse Cu toate acestea, o astfel de scădere a concentrației este limitată de faptul că viteza purtătorilor de sarcină într-un câmp electric crește până la o anumită limită ümax (vezi §) Deoarece densitatea de curent, de exemplu, una gaură, este legată de viteza purtătorilor de sarcină prin relația Jp = qpvp, (,) atunci valoarea minimă a concentrației purtătorilor de sarcină minoritari, care poate fi obținută la limita joncțiunii p-n, Rp gr min = - ; Pr, gr min = - (,) qVp max qVn max Expresiile ( ) pot fi considerate drept limite inferioare ale concentrației de purtători minoritari la limita joncțiunii pn Dependența concentrației la graniță a purtătorilor de sarcină minoritari de tensiune Pentru a rezuma, să construim pe o scară semilogaritmică dependența concentrației la graniță a purtătorilor minoritari de tensiunea la joncțiunea p-n (Fig) La curenți scăzuti, asta Orez Dependența concentrației la graniță a purtătorilor de sarcină minoritari din apropierea joncțiunii pn de tensiunea aplicată acestei joncțiuni: B arr T este domeniul de curenți mari inversați; M T - gama de curenți mici; B Pr T - gama de curenți continui mari , mirt DESPRE mt eu dependența este exponențială, iar pe scara aleasă este o linie dreaptă care trece prin valoarea concentrației de echilibru a

purtătorilor de sarcină minoritari la ¿¿ = nu are sens La curenți inversi mari, concentrația la limită a purtătorilor de sarcină minoritari tinde spre valoarea p/max) § METODE DE FORMARE ŞI CLASIFICAREA TRANZIŢIILOR ELECTRON-GAURA Dintre diferitele metode de formare a joncțiunilor p-η, două sunt de cea mai mare importanță: metoda fuzionarii și metoda difuziei impurităților O tranziție electron-gaură obținută prin fuziune într-un semiconductor (cu recristalizare ulterioară a) d) Orez Etapele tehnologice ale fuzionarii impurităților într-un singur cristal al unui semiconductor: a - o probă din materialul de topit , care conține o impuritate donor, pe suprafața unui monocristal semiconductor înainte de fuziune; b - topirea materialului de probă cu semiconductorul la o temperatură ridicată de topire; c - exces de strat de material proba pe suprafața semiconductorului recristalizat după răcire V) O) Orez tranziție de impurități abia difuzie Difuzia p-n- (a) și distribuția donatorilor în semiconductor (b): Na este concentrația inițială de acceptori; NΛ este concentrația de donatori după difuzie; x este adâncimea joncțiunii p-η formată semiconductor) a unui metal sau aliaj care conține impurități donor sau acceptoare se numește tranziție de aliaj, iar tranziția obținută ca urmare a difuziei atomilor de impurități într-un semiconductor se numește tranziție de difuzie Atunci când un metal sau un aliaj care conține impurități donor sau acceptoare este topit într-un semiconductor, semiconductorul cu o probă din materialul de topit este încălzit până când proba este topită, ca urmare a căreia o parte din cristalul semiconductorului se dizolvă în topitura eșantionului La răcirea ulterioară, cristalul semiconductor este recristalizat cu un amestec din materialul de sudat Dacă stratul recristalizat s-a dovedit cu un tip diferit de conductivitate electrică în comparație cu conductivitatea electrică a semiconductorului original, atunci la interfața lor apare o joncțiune pn (Fig) se folosește difuzia în semiconductor a unei impurități în fază gazoasă, lichidă sau solidă (Fig) Joncțiunile pn de difuzie, la rândul lor, pot fi de mai multe soiuri Astfel, o joncțiune p-n de difuzie formată ca urmare a difuzării unei impurități printr-o gaură dintr-un strat protector depus pe suprafața unui semiconductor se numește joncțiune p-n plană Ca strat protector pe siliciu, se folosește de obicei dioxidul aceluiași siliciu Pe fig prezintă etapele procesului tehnologic de formare a unei joncțiuni pn plane Baza acestei tehnologii este fotolitografia Un strat dintr-o substanță fotosensibilă, un fotorezistent FR, este aplicat pe placă originală de siliciu oxidat monocristal (Fig , a) Filmul fotorezistent este iluminat printr-o mască cu lumină ultravioletă (Fig) Locurile expuse ale fotorezistului polimerizează și devin insolubile După aceea, părțile nepolimerizate ale fotorezistului sunt spălate, astfel încât acesta să rămână numai în locurile iradiate (Fig , c) Apoi, filmul de dioxid este gravat, care rămâne doar în acele locuri unde a fost protejat de un strat de fotorezist (Fig , d) Ulterior, impuritatea necesară este difuzată în placa de siliciu originală Difuzia impurităților are loc selectiv - numai prin găuri sau ferestre din stratul de dioxid de siliciu (Fig , e) Pentru a crea structuri mai complexe, de exemplu, structuri de tranzistori cu două joncțiuni p și joncțiuni apropiate, este necesar Pot repeta încă o dată toate etapele luate în considerare ale procesului tehnologic, adică reoxidez placheta de siliciu, aplică un strat fotorezist, iluminează anumite părți ale suprafeței, conduce gravarea și difuzia impurităților prin ferestrele nou formate în stratul de dioxid de siliciu O joncțiune electron-gaură formată ca urmare a conversiei unui semiconductor

cauzată de difuzia înapoi a unei impurități într-o regiune adiacentă sau de activarea atomilor de impurități, se numește joncțiune pn de conversie Deci, pentru a crea o joncțiune de conversie p-n într-un monocristal de germaniu, se folosește germaniu, care conține două tipuri de impurități: donor și acceptor (cupru) Concentrația de cupru în germaniu trebuie să fie mai mare decât concentrația donatorilor, adică germaniul inițial are o conductivitate electrică de tip p Într-un astfel de germaniu, o probă de metal sau aliaj este topită Cuprul, care are un coeficient de difuzie ridicat în germaniu, difuzează din germaniu în probă atunci când este topit Ca rezultat, impuritatea acceptoare a cuprului este îndepărtată din stratul de germaniu adiacent probei, iar tipul de conductivitate electrică a acestui strat se modifică, adică are loc așa-numita conversie a semiconductorilor În producția de dispozitive semiconductoare, creșterea epitaxială este utilizată pe scară largă - creșterea straturilor monocristaline ale unui semiconductor pe suprafața unui substrat monocristal al aceluiași semiconductor și, uneori, Orez Schema procesului tehnologic de formare a unei joncțiuni p-/i plane: a - placă semiconductoare oxidată cu un fotorezist depus; b - expunerea fotorezistului printr-o mască sau fotomască; c - placa după dizolvarea fotorezistului nepolimerizat; (d) placa după gravarea stratului de oxid neprotejat; e - placa după îndepărtarea fotorezistului și difuzia acceptorului iar altul în compoziţia chimică a semiconductorului Cu creșterea epitaxială, în funcție de impuritatea utilizată, este posibil să se obțină un strat epitaxial cu același tip de conductivitate electrică ca și semi-ul original un conductor, dar cu o rezistivitate diferită, sau puteți obține un strat epitaxial cu un alt tip de conductivitate electrică, adică să creați o joncțiune pn epitaxială O metodă promițătoare pentru formarea joncțiunilor pn este metoda de inserție sau implantare ionică Esența acestei metode este bombardarea unui semiconductor cu ioni de impurități cu o energie de câteva zeci de kiloelectron-volți Energia necesară este obținută de ioni în timpul accelerării în câmpul electric al unui accelerator cu fascicul de ioni Perspectiva metodei de implantare ionică constă în posibilitatea dopării controlate a straturilor de suprafață și de sub suprafață ale unui semiconductor cu cantități dozate precis de aproape orice elemente chimice la o temperatură relativ scăzută a semiconductorului În funcție de natura distribuției concentrației de impurități, se disting tranzițiile p-n ascuțite și netede O tranziție în care grosimea regiunii de modificare a concentrației de impurități este mult mai mică decât grosimea tranziției pn se numește tranziție pn ascuțită O tranziție p-n ascuțită se obține de obicei prin fuziunea impurităților Tranziția, în care grosimea regiunii de modificare a concentrației de impurități este comparabilă sau mai mare decât grosimea tranziției pn, se numește tranziție pn lină O tranziție lină se obține de obicei în fabricație prin difuzie de impurități După raportul dintre concentrațiile purtătorilor de sarcină principali sau impuritățile corespunzătoare din regiunile p și η, se disting joncțiunile p-n simetrice și asimetrice Pentru joncțiunile p-n simetrice, concentrațiile purtătorilor de sarcină principali în regiunile p și n adiacente tranziției sunt aproximativ egale (pp ~ æ Ppo) Pentru joncțiuni pn asimetrice, inegalitatea ppo ppo) este valabilă În dispozitivele semiconductoare, există de obicei joncțiuni p-n dezechilibrate Pentru a desemna tranziții pn asimetrice, se folosesc următoarele simboluri: p + -p (sau p + -p) § DISTRIBUȚIE CÂMPUL ELECTRIC ȘI PUNCTELE POTENCIALE ÎN JONCȚIA ELECTRON-GAURA În absența curenților, distribuția intensității câmpului

electric și a potențialului în joncțiunea pn poate fi găsită prin rezolvarea ecuației Poisson ν φ= q-(pn + Na-Na) (,) εεο Cu toate acestea, chiar și pentru un sistem unidimensional, soluția unei astfel de ecuații cu alocație pentru purtătorii de taxe este dificilă Prin urmare, influența purtătorilor de sarcină asupra distribuției potențialului este de obicei neglijată, presupunând că aceștia sunt absenți în joncțiunea pn, în timp ce regiunile semiconductorului adiacente joncțiunii pn rămân neutre din punct de vedere electric Astfel de ipoteze sunt consistente yut tensiuni inverse și mici înainte la joncțiunea pn la curenți mici prin ea Apoi, pentru o joncțiune pn unidimensională plană, distribuția potențialului este determinată de ecuație =-¿-iad, ( ) dx~ yo unde N(x) = Na - Na este diferența dintre concentrațiile de donatori și acceptori Condițiile la limită necesare pentru rezolvarea ecuației pot fi scrise ținând cont de următoarele considerații La o graniță a joncțiunii p-n, unde x = -δρ (vezi Fig), luăm potențialul regiunii p ca zero, deoarece o valoare a potențialului poate fi luată în mod arbitrar Datorită faptului că intensitatea câmpului electric se modifică continuu în absența suprafețelor încărcate, ar trebui să fie aceeași la limita joncțiunii p-n ca în afara acesteia În practică, în regiunile neutre ale semiconductorului, intensitatea câmpului este întotdeauna mult mai mică decât în joncțiunea p-n și poate fi luată egală cu zero La cealaltă limită a joncțiunii p-n la χ = δη, valoarea potențialului este suma algebrică a diferenței de potențial de contact și a tensiunii externe u Deoarece tensiunea directă este scăzută din diferența de potențial de contact și se adaugă tensiunea inversă, atunci φ(δη) = φK H - și Astfel, condițiile la limită pentru ecuația ( ) iau forma pentru x = -δρ φ = , -^= ; d (,) pentru X - δη φ - fkon u, dx Numărul de condiții la limită s-a dovedit a fi mai mare decât ordinul ecuației (și) Acest lucru se datorează faptului că coordonatele de tranziție δρ și δη sunt necunoscute și sunt necesare condiții suplimentare pentru a le găsi Distribuția tensiunii Să rescriem ecuația ( ) în următoarea formă: Pentru a simplifica notația, în cele ce urmează vom folosi integrale definite cu limite variabile Acest lucru face posibilă nu folosirea constantelor arbitrare dacă limitele integrării sunt consistente Apoi d(f/dx X SAU E = - r-=- $ N(x)dx ( ) dx εε H - Op Relația ( ) face posibilă găsirea distribuției intensității câmpului electric sau a gradientului de potențial în joncțiunea p-n cu orice caracter al modificării diferenței dintre concentrațiile de donatori și acceptori din aceasta Dacă luăm în considerare condițiile la limită ( ) pentru această ecuație, atunci N(x)dx = Q ( ) -δρ Ecuația ( ) este condiția pentru neutralitatea electrică a joncțiunii pn, adică indică faptul că sarcina totală imobilă a impurităților ionizate de pe o parte a contactului metalurgic este egală cu sarcina totală imobilă a impurităților ionizate de pe cealaltă parte a contactul metalurgic Distribuție potențială Pentru a calcula distribuția potențialului, este necesar să se integreze gradientul de potențial, i e (,) După înlocuirea ( ) în ( ), avem φ Partea dreapta: parte a primit expresiile vor fi integrate peste ţj ydx = yx - ţxdy, unde y= ţj N(x)dx și - δρ dy=d [$ W(x)dx] = N(x)dx\LSp - bp Apoi φ = ~ E $ N(x)dx- xjV(x)i/x ( ) - δρ - δρ Dacă pentru această ecuație, care arată distribuția potențialului în joncțiunea pn, luăm în considerare condițiile la limită ( ), atunci scăderea potențialului total la joncțiunea pn δ" Fcon - u=- - xN(x)dx (θ) Ecuația de neutralitate electrică pentru joncțiunea pn ( ) și ecuația pentru căderea totală de tensiune pe joncțiunea pn ( ) este un sistem de două ecuații cu două necunoscute,

limitele integrării Rezolvarea acestui sistem de ecuații dă poziția limitelor joncțiunii p-n (δρ și ôrt), care au rămas până acum nedefinite Metode de rezolvare a ecuaţiilor obţinute Soluție numerică Metodele numerice pentru rezolvarea ecuațiilor pentru distribuția intensității câmpului electric și potențialului în joncțiunea p-n ar trebui aplicate cu o distribuție complexă a concentrației de impurități Pentru o astfel de soluție se folosește o metodă de integrare numerică Soluția începe la o coordonată arbitrară x = -δρ Efectuați o determinare numerică a gradientului de potențial dy/dx Această integrală crește mai întâi în valoare absolută și apoi scade, trece prin zero și își schimbă semnul Valoarea coordonatei la care este îndeplinită condiția de neutralitate electrică determină a doua limită a joncțiunii pn Cu toate acestea, valoarea tensiunii rămâne necunoscută Pentru a-l determina, se integrează gradientul potențial dy/dx Valoarea acestei integrale la χ = δη dă valoarea tensiunii la joncțiunea pn φK H-H Astfel, tensiunea la joncțiunea pn cu metoda numerică de soluție se obține nu ca argument, ci ca funcție Dacă este necesar să se efectueze un calcul pentru o anumită tensiune, atunci coordonatele sunt ajustate - δρ În cursul unei astfel de soluții, distribuțiile intensității câmpului electric și potențialului în joncțiunea pn sunt obținute ca valori intermediare ale integralelor Soluție analitică O soluție analitică este posibilă în cazurile în care distribuția concentrației de impurități este o funcție integrabilă analitic și sistemul de ecuații rezultat are o soluție analitică În special, o soluție analitică este posibilă pentru o tranziție pn ascuțită, pentru o tranziție pn lină cu o distribuție liniară a concentrației de impurități și alte tranziții pn netede § CALCUL ANALIT A UNEI TRANZIȚII ELECTRON-GAURA ASCUȚITE În conformitate cu definiția unei tranziții p-n ascuțite (vezi §), putem presupune că concentrația de impurități se modifică brusc la contactul metalurgic și rămâne constantă în părțile rămase ale tranziției, adică şi N(x)=-Nap la - p χ> Distribuția tensiunii Pentru x , trebuie luat în considerare faptul că integrandul din ( ) are o discontinuitate Prin urmare, este indicat să scrieți Despre X (Ά- =^-(N^P-NΛηχ) (,) Astfel, pentru o tranziție p-n bruscă, se obține o dependență liniară a gradientului potențial sau intensității câmpului electric în joncțiunea p-n, cea mai mare valoare a gradientului se obține la contactul metalurgic (Fig) Distribuție potențială Orez Distribuția concentrației de impurități VV(x), densitatea de sarcină spațială g, gradientul de potențial ¿/φ/í/χ al-lea potențial φ într-o joncțiune p-n ascuțită fără a lua în considerare purtătorii de sarcină (-) și inclusiv purtătorii de taxe ( ) Pentru a calcula distribuția potențială, este necesar să se integreze expresiile pentru gradientul său, adică ( ) și ( ) Apoi Cpp ~~ Nap (x &p)dx - Na^x+δ₽) (°) -δ, Sunt M Â J ? εε Nap OpX Și O O DESPRE -ihN'-x' , dar nu poate depăși φK H, deoarece la u -> φK H joncțiunea pn dispare Orez Diagrama energetică a unei tranziții p-n ascuțite asimetrice într-o stare de echilibru cu un strat invers într-o regiune ușor dopată a tranziției (a) și distribuția purtătorilor de sarcină într-o astfel de tranziție (b) Influența purtătorilor de sarcină Purtătorii de sarcină mobili pot influența distribuția gradientului de potențial și a potențialului într-o joncțiune p-n ascuțită în apropierea limitelor sale și în apropierea contactului metalurgic Aproape de granițele joncțiunii p-n, ținând cont de ipotezele adoptate pentru calcule, densitatea de încărcare spațială a impurităților necompensate se modifică brusc de la zero în afara joncțiunii p-n la o valoare care diferă doar cu un factor q de Ύ(χ), adică, în cadrul diagramei de

tranziție pn a distribuției densității sarcinii spațiale diferă de graficul distribuției concentrației de impurități doar la scară (Fig) În realitate, totuși, densitatea volumului de sarcină nu se poate schimba brusc, deoarece aceasta ar corespunde unui gradient de concentrație infinit de purtători de sarcină și prezenței unei difuzii infinit de mari curenti Prin urmare, granițele tranziției pn ar trebui să fie neclare și ar trebui să existe "cozi" în distribuțiile gradienților potențial și potențial (Fig) În apropierea contactului metalurgic al unei joncțiuni pn ascuțite asimetrice, concentrația purtătorilor de sarcină poate diferi și ea semnificativ de a sa, ceea ce este ilustrat de diagrama energetică a joncțiunii pn în starea de echilibru (Fig) Cu asimetria joncțiunii pn, contactul metalurgic este mai aproape de regiunea puternic dopată, iar scăderea potențialului este mai mică acolo Nivelul Fermi traversează mijlocul benzii interzise nu la contactul metalurgic, ci la partea ușor dopată a joncțiunii pn Tipul de purtători de sarcină predominanți este determinat de poziția reciprocă a nivelului Fermi și a mijlocului benzii interzise: acolo unde nivelul Fermi este deasupra mijlocului benzii interzise, predomină electronii, unde sub - găuri În consecință, granița schimbării tipului de purtători de sarcină nu coincide cu contactul metalurgic, adică, într-un anumit strat al părții ușor dopate a joncțiunii p-n, tipul de purtători de sarcină predominanți (principali) nu corespunde cu tip de impurități Un astfel de strat, așa cum este indicat (vezi §), se numește invers § CALCUL ANALIT AL UNEI TRANZIȚII ELECTRON-GAURA LISATE CU DISTRIBUȚIE LINEARĂ A CONCENTRAȚIEI DE IMPURITATE Legea distribuției liniare impurităţi N(x) = ax, (,) aici a este gradientul de concentrație a impurităților, care poate fi considerat constant la o grosime foarte mică, tranziție p-n, în comparație cu grosimea regiunii în care concentrația de impurități este variabilă Distribuția tensiunii Soluția ecuației ( ), ținând cont de ( ), dă dependența gradientului de potențial într-o joncțiune pn netedă cu o distribuție liniară a concentrației de impurități: ¿/φ ~ãx Orez Distribuția concentrației de impurități V(x) densitatea de sarcină spațială g, gradientul potențial dy / dx și potențialul φ într-o tranziție p-n lină fără a lua în considerare purtătorii de sarcină (-) și luând în considerare purtătorii de sarcină ( ) αχ |· εε -δ, În cialati (Fig) (,) în acest caz, gradientul poten-se modifică odată cu modificarea coordonatelor printr-o parabolă pătratică Distribuție potențială Pentru a determina potențialul, este necesar să se integreze gradientul potențialului ( ): ~(τ-ψ-) (' θρ Astfel, potențialul într-o joncțiune pn netedă cu o distribuție liniară a impurităților se modifică cu o modificare a coordonatei de-a lungul unei parabole cubice (Fig) Determinarea limitelor și grosimii joncțiunii p-n Rezolvarea ecuației de neutralitate electrică ( ) conduce în acest caz la relația δρ = δπ = δ/ , (,) adică tranziția considerată este simetrică Din ecuația ( ), ținând cont de ( ), se poate obține căderea totală de potențial la joncțiunea pn: φ" - " = φ( ) - (SB)=^ δί,=Ī£- δ' (,) De aici și grosimea joncțiunii pn netede cu o distribuție liniară a impurităților g εεο(ψκοΗ^ ββ) Influența purtătorilor de sarcină Într-o tranziție lină p-n cu o distribuție liniară a concentrației de impurități, datorită simetriei tranziției, nu se formează un strat invers dacă nu există o asimetrie semnificativă în densitatea stărilor de energie în benzile de energie permise, adică dacă nu există diferență accentuată a maselor efective ale purtătorilor de sarcină de diferite semne La granițele unei tranziții p-n netede, efectul purtătorilor de sarcină este similar cu efectul purtătorilor la o tranziție p-n bruscă § CAPACITATEA DE

BARIERĂ A JONCȚIUNII ELECTRON-GAURA Capacitatea barieră ca manifestare a curenților de polarizare Capacitatea de barieră a joncțiunii pn se manifestă atunci când o tensiune variabilă în timp este aplicată joncțiunii pn În acest caz, un curent trece prin joncțiunea pn Acea parte a curentului, care nu este asociată cu mișcarea purtătorilor de sarcină prin joncțiunea pn, determină capacitatea barierei Prin urmare, capacitatea barierei trebuie să fie asociată cu trecerea curenților de polarizare Pentru o joncțiune pn plată unidimensională, curentul de polarizare este același în toate secțiunile sale: i-SJCM = S-^ (εεο£), p-n-tranziție deplasările pot fi asociate cu o modificare a volumului - vom evidenția mental acest lucru E i unde S este aria Valoarea taxei curente Căci sub formă de cilindru (sau prismă), ale căror generatoare sunt paralele cu axa x - direcția câmpului electric (Fig) Lasă o bază a cilindrului să se afle în afara joncțiunii pn, iar cealaltă - în interiorul acesteia Apoi, conform teoremei Ostrogradsky-Gauss, este posibil să se determine fluxul vectorului de inducție electrică prin suprafața care delimitează volumul selectat Acest flux trece printr-o singură bază a cilindrului, deoarece suprafețele sale laterale sunt paralele cu câmpul electric, iar a doua baza se află în regiunea în care câmpul este absent Prin urmare, εεο£, = £ , unde Q este sarcina impurităților ionizate Curentul de polarizare poate fi acum scris după cum urmează: dQ dQ dU l~ dt ~ dU dt ' Comparând ultima expresie cu expresia obișnuită pentru curentul prin capacitate, adică cu cu dU Lc=S~' obținem că trebuie luată capacitatea barieră r - ^ Sbar-I ¿ în volumul p-n-joncţiunii eu eu p fi P Orez La derivarea expresiei pentru capacitatea de barieră a joncțiunii pn (,) J Valoarea absolută a acestui raport este luată deoarece sarcina spațială din joncțiunea pn poate fi pozitivă și negativă, iar regula semnului pentru tensiune este aleasă în mod arbitrar Astfel, capacitatea barieră este cuplată la curentul de polarizare (la fel ca o capacitate convențională) Relația generală pentru capacitatea de barieră a unei tranziții electron-gaură Pe baza definiției capacității de barieră ( ), se poate obține o formulă generală pentru capacitatea de barieră a unei joncțiuni pn plate Sarcina spațială a impurităților ionizate din cilindrul izolat în joncțiunea p-/r, Q = qS N(x)dx Diferența acestei sarcini spațiale poate fi determinată prin diferențierea față de o singură variabilă, limita inferioară de integrare: dQ = -qSN(-òp)d(-òp) (,) Creșterea de tensiune sau diferența de cădere de tensiune la joncțiunea pn poate fi găsită prin diferențierea expresiei ( ) Cu toate acestea, trebuie luat în considerare faptul că ambele limite de integrare din expresia ( ) sunt variabile Prin urmare, este recomandabil să împărțiți integrala în două, apoi fiecare dintre ele va avea o limită variabilă: DESPRE - $ xA\x)rfx=-¡^- [$ xN(x)dx-\- ÇxAf(x)dxJ δη O fcon ȘI dU=-^-[Ôp V(-ôp)d(-Ôp) + ÒnN^dòn] εεο Acum, luând raportul diferenţialelor ( ) şi ( ), obţinem (,) qSN(-òp)dòf ' -^[ÔpA'(- p)d(-óp) + ^(")d "] ' εο Pentru a transforma ultima expresie, diferențiem condiția de neutralitate electrică a joncțiunii pn ( ): G) dòn - M - δρ) d(- δρ) = O, adică N(òn)dòn = N(-òp)d(-òp) Luăm în considerare că δ = δP + δη, apoi kMJ Cbar=eeo / ( ) ~"^ L- -i ' Astfel, capacitatea barierei este plată dintre care tranziția p-n unidimensională poate fi calculată folosind formula condensatorului plan Tora Acest rezultat nu este evident nym, deoarece distribuția sarcinilor într-un condensator plat și într-o joncțiune electron-gaură nu este aceeași Motivul coincidenței formulelor este în natura modificării sarcinii joncțiunii p-/r: atunci când tensiunea la joncțiunea p-/r se modifică, sarcina se modifică deoarece limitele p-/r-joncțiunii /r-joncțiunea sunt deplasate

capacitatea barieră este concentrată în două straturi subțiri situate la o distanță δ unul de celălalt (Fig:), Schimbare Orez grosimea joncțiunii pn și încărcarea spațiului atunci când tensiunea la joncțiunea pn se modifică Taxe, condiționate care este foarte asemănător cu sarcinile de suprafață de pe plăcile metalice ale unui condensator Raporturi parțiale pentru capacitatea de barieră a diferitelor tranziții electron-gaură Folosind expresia ( ), se poate determina capacitatea barierei pe baza rezultatelor calculării grosimii joncțiunii pn Prin urmare, pentru o tranziție pn ascuțită, ținând cont de ( ), sat ar ρεεοΛ/apN (AZap + Nun) (fkon - uy (,) Pentru o tranziție p-n asimetrică ascuțită, ținând cont de ( ) ç / qzsÕN ò V (φKOH - Í) ' (,) unde Λ este concentrația de impurități în regiunea ușor dopată Pentru o tranziție p-nr lină cu o distribuție liniară a concentrației de impurități, ținând cont de ( ), Sbar = (,) După cum se poate observa din rezultatele obținute, au loc diferite caracteristici de capacitate-tensiune ale tranzițiilor p-/r pentru diferite distribuții de impurități Acest lucru face posibilă evaluarea naturii distribuției impurităților în diferite joncțiuni pn Metoda grafică este de asemenea folosită des Pentru o tranziție p-gg ascuțită, caracteristica capacitate-tensiune se dovedește a fi dreaptă în coordonatele / Cbar din C și pentru o tranziție lină cu o distribuție liniară a impurităților - în coordonatele / Cbar din U (Fig) Dacă punctele experimentale se află pe linii drepte în sistemele de coordonate indicate, atunci aceasta servește drept confirmare (dar nu dovadă) a caracterului distribuției impurităților adoptate în construcție Cu toate acestea, caracteristicile capacitate-tensiune sunt legate în mod ambiguu de distribuția impurităților în joncțiunea pn, adică aceleași caracteristici capacitate-tensiune pot corespunde cu o LP), se obține un strat epuizat sau invers într-un semiconductor de tip / și un strat îmbogățit într-un strat de gaură Orez Formarea de epuizat (a), invers (b) și îmbogățit (c) straturi din semiconductor în apropierea contactului metalurgic cu metalul atunci când funcția de lucru în metal este mai mică decât în semiconductor A) V) Orez Modificarea înălțimii barierei de potențial la o joncțiune de redresare fără injectare între un metal și un semiconductor cu o modificare a tensiunii externe: a - nu există tensiune externă; b - tensiune externă directă; c - inversarea tensiunii externe În straturile epuizate, sarcina spațială se formează ca urmare a încălcării compensării de sarcină a impurităților ionizate de către purtătorii majoritari, iar în straturile îmbogățite, datorită acumulării purtătorilor de sarcină majoritari Stratul îmbogățit determină o rezistență scăzută a regiunii de aproape contact a semiconductorului în comparație cu rezistența majorității semiconductorului De- E Orez Acumularea de purtători minori de sarcină (găuri) în apropierea unei tranziții ohmice între un metal și un semiconductor în prezența unui câmp electric extern Prin urmare, o astfel de tranziție nu are proprietăți de rectificare; În prezența unui strat epuizat sau invers, joncțiunea Schottky are proprietăți de redresare, deoarece tensiunea externă, căzând în principal pe o joncțiune de mare rezistență, va modifica înălțimea barierei sale de potențial, modificând condițiile de trecere a purtătorilor de sarcină prin joncțiunea O trăsătură caracteristică a joncțiunii de redresare Schottky, spre deosebire de joncțiunea pn, este înălțimile diferite ale barierei de potențial pentru electroni și găuri Ca rezultat, injectarea purtătorilor de sarcină minori în semiconductor poate să nu aibă loc prin joncțiunea Schottky Luați în considerare fig Când o astfel de tranziție este activată în direcția înainte (Fig , b), înălțimea

barierei de potențial pentru găuri (PBD) în regiunea aproape de contact a semiconductorului scade, găurile vor trece de la semiconductor în metal Cu cât tensiunea directă este mai mare, cu atât este mai mare probabilitatea unei astfel de tranziții a găurilor Cu toate acestea, înălțimea barierei de potențial pentru electroni (PBE), care se poate deplasa de la metal la semiconductor, rămâne relativ mare Prin urmare, fluxul de electroni din metal în semiconductor va fi relativ mic, adică practic nu va exista injecție de purtători de sarcină minori în semiconductor Cu o polaritate diferită a tensiunii externe (cu o tensiune inversă), bariera de potențial pentru găuri se ridică (Fig , c) și mișcarea lor prin joncțiune se oprește Pentru transportatorii minori de taxe (pentru electroni în acest exemplu) câmpul din joncțiune se dovedește a fi accelerat Prin urmare, trecând prin joncțiune, purtătorii minoritari de sarcină formează un curent invers, care va fi mic datorită concentrației scăzute de purtători minoritari în semiconductor Dacă diferența dintre funcțiile de lucru este mare, atunci se formează un strat invers în regiunea aproape de contact a semiconductorului (vezi Fig , b) În acest caz, la tensiuni directe joase, purtătorii minoritari vor fi injectați printr-o astfel de joncțiune din stratul invers în masa adiacentă a semiconductorului La tensiuni directe ridicate, stratul invers poate dispărea În joncțiunile ohmice formate ca urmare a contactului dintre un metal și un semiconductor, poate apărea o acumulare de purtători minori de sarcină din cauza formării transpirațiilor bine cial pentru purtătorii minoritari în regiunea aproape de contact a semiconductorului (Fig) Un astfel de fenomen, așa cum este menționat în § , poate afecta performanța dispozitivelor semiconductoare Pentru a elimina acest fenomen, este necesară eliminarea barierei de potențial la contactul metal-semiconductor prin selectarea perechilor de materiale în contact cu aceleași funcții de lucru Cu toate acestea, acest lucru este impracticabil în practică din cauza setului limitat de materiale și a necesității de a reselege metalul pentru fiecare concentrație de impurități din semiconductor și pentru fiecare temperatură Pentru a elimina efectul acumulării purtătorilor de sarcină minoritari în semiconductorul din apropierea contactului, poate fi efectuată dopaje suplimentară a regiunii de aproape contact a semiconductorului În acest caz, bariera de potențial rămâne, dar grosimea acesteia va fi foarte mică datorită dopajului puternic al regiunii de aproape contact a semiconductorului Grosimea mică a barierei de potențial va face posibil ca purtătorii de sarcină minoritari să pătrundă în metal din puțul de potențial din semiconductor § HETEROJONCȚII O heterojuncție este un strat de tranziție cu un câmp electric de difuzie existent acolo între doi semiconductori de compoziție chimică diferită Când se formează o heterojuncție, datorită diferitelor funcții de lucru ale electronilor din semiconductori diferiți, purtătorii de sarcină sunt redistribuiți în regiunea aproape de contact și egalizează Orez Diagramele energetice ale heterojoncțiilor: a - heterojuncție de rectificare între semiconductori cu conductivitate electrică de tip p și n cu injecție preferențială de electroni într-un semiconductor cu decalaj îngust; b - heterojuncție de rectificare între semiconductori cu conductivitate electrică de tip n fără injectarea purtătorilor de sarcină minori formarea nivelurilor Fermi ca urmare a stabilirii echilibrului termodinamic (Fig) Toate celelalte niveluri de energie și benzi ar trebui să se îndoaie în consecință, adică un câmp electric de difuzie și o diferență de potențial de contact apar în heterojoncție În acest caz, nivelul de energie al plafonului zonei libere superioare trebuie

să fie continuu De obicei, nivelul de energie al plafonului benzii libere superioare este nivelul de energie al plafonului benzii de conducere, deoarece benzile de energie liberă se suprapun Diferența de potențial de contact care apare la heterojoncțiune este determinată de deplasarea relativă a plafonului zonei libere superioare a semiconductorilor care formează heterojoncția Lățimea benzilor de energie ale diferitelor semiconductori este diferită Prin urmare, la interfața dintre doi semiconductori (la contactul metalurgic al heterojoncțiunii), se obține de obicei o discontinuitate a fundului benzii de conducere Discontinuitatea fundului benzii de conducție este determinată de diferența de energii de afinitate electronică a celor doi semiconductori în contact (energia afinității electronilor este diferența dintre energiile din partea superioară a benzii superioare libere și cele din partea inferioară a benzii de conducere) Ruperea în partea superioară a benzii de valență depinde atât de diferența dintre energiile de afinitate, cât și de diferența dintre benzile interzise ale semiconductorilor în contact Ca urmare a întreruperii în partea inferioară a benzii de conducție și în partea superioară a benzii de valență, înălțimile barierelor de potențial pentru electroni și găurile din heterojuncție se dovedesc a fi diferite Aceasta este o caracteristică a heterojoncțiilor, care determină proprietățile specifice ale heterojoncțiilor, spre deosebire de joncțiunile pn, care sunt formate într-un singur cristal al unui singur semiconductor Fiecare dintre semiconductorii care formează heterojoncția poate avea un tip diferit de conductivitate electrică Prin urmare, pentru fiecare pereche de semiconductori, în principiu, pot fi implementate patru tipuri de heterostructuri: pi-n ; n\-P \ n\-p și pi-p Dacă în apropierea interfeței dintre doi semiconductori care formează o heterojuncție apar straturi epuizate în purtătorii principali (straturi cu rezistivitate crescută), atunci partea principală a tensiunii externe aplicată structurii cu o heterojuncție va cădea pe straturile epuizate Înălțimea barierei de potențial pentru purtătorii de sarcină principale se va modifica: scade când polaritatea tensiunii externe este opusă polarității diferenței de potențial de contact și crește când polaritățile tensiunii externe și diferența de potențial de contact coincid Astfel, heterojoncțiile pot avea un efect de rectificare (Figura) Datorită diferenței de înălțime a barierelor de potențial pentru electroni și găuri, curentul continuu prin heterojoncțiune este cuplat în în principal cu deplasarea purtătorilor de sarcină de un singur semn Prin urmare, heterojoncțiile pot fi atât purtători minoritari injectați (Fig , a) cât și neinjectați (Fig , b) Injectarea purtătorilor de sarcină minoritari are loc întotdeauna dintr-un interval larg într-un semiconductor cu decalaj îngust În heterojoncțiunile formate din semiconductori cu un tip de conductivitate electrică, rectificarea are loc fără injectarea purtătorilor de sarcină minori De obicei, semiconductorii cu compoziție chimică diferită diferă unul de celălalt în funcția de lucru a electronilor, lățimea benzii interzise, lățimea benzilor permise și alți parametri Cu toate acestea, pentru formarea unei heterojoncții de înaltă calitate, este necesar să se potrivească tipul, orientarea și perioada rețelelor cristaline ale semiconductorilor de contact, astfel încât rețeaua cristalină a unui semiconductor cu un număr minim de încălcări să treacă în cristal rețeaua altui semiconductor Într-o heterojuncție ideală, nu ar trebui să existe solicitări mecanice, defecte structurale și alte defecte care pot crea condiții pentru o recombinare intensă și generarea de purtători de sarcină - capcane de

recombinare Dacă o heterojuncție conține un număr mare de capcane de recombinare, mecanismul de trecere a curentului printr-o astfel de heterojuncție reală poate diferi substanțial de mecanismul de trecere a curentului printr-o heterojuncție ideală Este posibil ca o astfel de heterojuncție să nu aibă un efect de rectificare În plus față de proprietățile specifice considerate ale heterojoncțiilor (rectificare cu un coeficient de injecție ridicat într-un semiconductor cu distanță îngustă, rectificare fără injecție de purtători minoritari la o heterojoncție din semiconductori cu un tip de conductivitate electrică), diferențe în spectrele de absorbție și indici de refracție a luminii semiconductoarelor care formează o heterojoncție se dovedesc a fi interesante și utile pentru dispozitivele semiconductoare Cele mai utilizate în dispozitivele semiconductoare sunt heterojoncțiunile dintre semiconductori de tip LIIVV și soluțiile lor solide pe bază de arseniuri de galiu și aluminiu, fosfuri și antimonide Datorită apropierii razelor covalente de galiu și aluminiu, modificarea compoziției chimice a semiconductorilor din heterojoncțiune are loc fără modificarea perioadei rețelei cristaline Heterojoncțiunile sunt create și pe baza soluțiilor solide multicomponente (cuaternare și mai multe), în care perioada rețelei nu se modifică atunci când compoziția se modifică într-un interval larg Principala metodă de formare a heterostructurilor este metoda creșterii epitaxiale a cristalelor semiconductoare Toate tipurile de tranziții electrice considerate mai devreme (joncțiunea pn, joncțiunea np+, joncțiunea pp+, joncțiunea Schottky) pot fi considerate cazuri speciale ale tipului general de tranziții electrice, heterojoncțiunea § PROPRIETĂȚI ȘI PARAMETRI AI TRANZIȚIILOR OHMICE Cerințe pentru tranzițiile ohmice Tranzițiile ohmice sunt de mare importanță în dispozitivele semiconductoare și în cercetarea semiconductoarelor Scopul principal al joncțiunilor ohmice este conexiunea electrică a unui semiconductor cu părțile conductoare metalice ale unui dispozitiv semiconductor Există mai multe tranziții ohmice în dispozitivele semiconductoare decât cele de rectificare Cazurile de defecțiuni și defecte de fabricație ale dispozitivelor semiconductoare din cauza calității slabe a tranzițiilor ohmice sunt destul de frecvente În dezvoltarea dispozitivelor semiconductoare, crearea de joncțiuni ohmice perfecte necesită adesea mai mult efort decât crearea de joncțiuni de redresare În ciuda acestui fapt, teoria tranzițiilor ohmice este mai puțin dezvoltată decât teoria tranzițiilor electron-gaură, iar formarea tranzițiilor ohmice se bazează adesea pe experiment O tranziție ohmică are un efect negativ mai mic asupra caracteristicilor și parametrilor unui dispozitiv semiconductor în următoarele condiții:) dacă nu există injecție de purtători minoritari de sarcină prin joncțiunea ohmică în regiunea adiacentă a semiconductorului și acumularea de purtători minoritari în sau în apropierea joncțiunii ohmice;) cu căderea minimă posibilă de tensiune pe joncțiunea ohmică, adică cu rezistența sa minimă;) dacă CVC-ul tranziției ohmice este liniar, adică dacă tranziția ohmică este într-adevăr ohmică Parametrii tranzițiilor ohmice Pentru a putea stabili cât de mult trece tranziția ohmică satisface cerintele impuse acestuia, iar pentru a putea compara intre ele diferite tranzitii ohmice este necesara introducerea unor parametri cantitativi care caracterizeaza aceste tranzitii Rata de recombinare la tranziția ohmică Rata de recombinare la o tranziție ohmică arată cât de mult se poate abate concentrația purtătorilor de sarcină din apropierea acesteia de la concentrația de echilibru Rata de recombinare la tranziția ohmică este introdusă în mod similar cu rata de recombinare la suprafață [vezi ( )]

ca raport al densității de flux a purtătorilor de sarcină prin tranziția la concentrația în exces a acestor purtători la tranziție, adică SP Fr / (Pgr - Po) Dimensiunea vitezei de recombinare la o tranziție ohmică este aceeași cu dimensiunea vitezei de mișcare, deoarece densitatea fluxului purtător este produsul dintre concentrație și viteza (fr = pvp) Evident, cu cât rata de recombinare este mai mare, cu atât mai mică este abaterea concentrației purtătorului de la valoarea de echilibru pentru un flux de purtător dat, cu atât calitatea tranziției ohmice este mai mare La o densitate mare a fluxului purtătorului de sarcină, concentrația la limită depășește semnificativ concentrația de echilibru a acelorași purtători (pgr > Po), deoarece viteza purtătorilor este limitată Prin urmare, Orez Dependența concentrației la graniță a purtătorilor de sarcină în apropierea unei tranziții ohmice de fluxul sau densitatea de curent a acestor purtători " fr Prpüp Sn -~ Un Rgr Po Rgr Po Astfel, rata de recombinare la o tranziție ohmică nu depășește viteza de mișcare a purtătorilor de sarcină Dacă transferul purtătorilor de sarcină la joncțiune este cauzat de difuzie, atunci viteza de mișcare nu poate depăși viteza termică Dacă transferul purtătorului este cauzat de derivă, atunci viteza este limitată și de valoarea vitezei maxime, care este de ordinul vitezei termice (vezi §) Astfel, viteza de recombinare la o tranziție ohmică nu depășește viteza termică a purtătorilor de sarcină Acest lucru este de importanță practică, deoarece nu are rost să încerci Orez Determinarea căderii de tensiune la o joncțiune prin extrapolarea distribuției de potențial într-un semiconductor pentru a îmbunătăți tranzițiile ohmice, rata de recombinare la care se apropie de maximul posibil Pe fig arată dependențele concentrației la limită a purtătorilor de sarcină în apropierea unei tranziții ohmice ideale cu o rată de recombinare infinit de mare (/), pentru un real tranziție ohmică cu o rată de recombinare egală cu viteza maximă de purtător posibilă ( ) și pentru o tranziție ohmică reală cu o rată de recombinare care nu depășește viteza maximă de purtător (DESPRE δ) DESPRE V) Orez Ramuri directe ale CVC ale diodei la diferite temperaturi (a), la diferite benzi interzise ale materialului de pornire (b) și la diferite concentrații de impurități în regiunile adiacente joncțiunii p-m (c) Orez Extragerea purtătorilor minoritari din regiunile adiacente joncțiunii p-m la diferite tensiuni inverse ale diodei regiunile care conduc la tranziție (vezi § și Fig , f) Aceasta duce la o scădere a concentrației la limită a purtătorilor minoritari de sarcină în apropierea joncțiunii p-n și la apariția difuziei purtătorilor minoritari la joncțiune - există un curent de difuzie a purtătorilor minoritari rezultat din generarea termică în volumul n- și p-regiunile diodei, precum și pe joncțiunile ohmice În timpul vieții înainte de tranziția p-n, purtătorii minoritari pot difuza, care au apărut în regiunile p și p la distanță ion care nu depășește lungimea de difuzie corespunzătoare (Fig , a, b) Transportatorii minoritari rămași, neavând timp să ajungă la tranziție, se recombină în vrac Acest lucru este valabil pentru diferite tensiuni inverse pe diodă, dacă grosimile regiunilor adiacente joncțiunii depășesc lungimile de difuzie ale purtătorilor de sarcină minoritari Prin urmare, curentul invers, pornind de la valori foarte mici ale tensiunii inverse, nu se va modifica odată cu modificarea tensiunii (vezi Fig) Acest curent invers prin diodă, care nu se modifică cu tensiunea, se numește curent de saturație Luând în considerare procesele fizice dintr-o diodă sub tensiune inversă, este posibilă exprimarea densității curentului de saturație în funcție de parametrii materialului semiconductor Pentru a

face acest lucru, trebuie să reamintim relația generală pentru densitatea de curent în prezența a două tipuri de purtători de sarcină: J = q(pvp + pvp), unde Vp și vp sunt ratele fie de difuzie, fie de derive a găurilor și a electronilor Într-o diodă, purtătorii minoritari difuzează spre joncțiune, astfel încât ratele lor pot fi reprezentate ca lungimi de difuzie împărțite la duratele lor de viață respective În loc de concentrațiile totale p și n, înlocuim concentrațiile purtătorilor minoritari, deoarece curentul invers al diodei este asociat cu mișcarea purtătorilor de sarcină minoritari Apoi /us = Pro - Y( ) X τρ τη / Dacă luăm în considerare relațiile ( ), precum și ionizarea aproape completă a impurităților la temperatura camerei, atunci ( ) poate fi redusă la forma Pe măsură ce temperatura diodei crește, densitatea curentului de saturație crește, deoarece concentrația intrinsecă a purtătorilor de sarcină crește exponențial cu temperatura [vezi Fig ( )] În diodele bazate pe un material cu o bandă interzisă mai mare, densitatea curentului de saturație ar trebui să fie mult mai mică, deoarece concentrația intrinsecă scade exponențial odată cu creșterea benzii interzise [vezi ( )] Comparând diodele cu germaniu și siliciu și ținând cont de diferența dintre concentrațiile purtătorilor intrinseci din germaniu și siliciu, care este de trei ordine de mărime (vezi §), ar trebui să se concluzioneze că densitatea curentului de saturație în diodele de siliciu ar trebui să fie mai mică de șase ordine de mărime Cu o creștere a concentrației de impurități în regiunile adiacente joncțiunii, densitatea curentului de saturație, în conformitate cu ( ) ar trebui să scadă § CALCULUL DISTRIBUȚIEI PURTĂTORILOR MINORITARI ÎN BAZĂ DE DIODĂ De exemplu, să efectuăm un calcul pentru o diodă cu o joncțiune asimetrică electron-gaură p + -n (Fig) atunci când i se aplică o tensiune, care are o componentă constantă și o componentă variabilă mică: u = U + (,) Aici componenta variabilă este scrisă ca o valoare complexă în formă exponențială Deoarece în ( ) se adaugă componentele constante și variabile, doar proiecția vectorului de tensiune variabilă pe axa reală are sens fizic Orez Model de diodă unidimensională acceptat pentru calcul Pentru comoditatea transformărilor matematice, alegem următoarea condiție pentru micșorarea componentei variabile a tensiunii: UmCkT/q, (,) adică, amplitudinea componentei de tensiune variabilă nu trebuie să depășească ~ mV Ipoteze în calcul Pentru a facilita calculele, se alege de obicei un model simplificat al structurii unui anumit dispozitiv În acest caz, să presupunem că:) joncțiunea p-n a diodei este plată, adică vom lua în considerare un model unidimensional al diodei (Fig);) curenții sunt mici și nu provoacă o cădere semnificativă de tensiune pe rezistența de bază a diodei; astfel, câmpul electric este concentrat doar în joncțiunea p-n;) tranzițiile ohmice sunt ideale, adică în jurul lor într-un semiconductor există întotdeauna doar o concentrație de echilibru a purtătorilor de sarcină;) fenomenele de suprafață sunt nesemnificative;) procesele de generare sau recombinare a purtătorilor de sarcină neechilibrați nu au loc în joncțiunea pn;) recombinarea purtătorilor minoritari în volumul bazei este liniară, adică numărul de purtători care se recombină pe unitatea de volum pe unitatea de timp este direct proporțional cu concentrația în exces: O Δρη Rp RpO I\n = = g t " t " (,) Ecuatii diferentiale Principala pentru rezolvarea problemei este ecuația de continuitate, de exemplu, pentru găurile de la baza unei diode cu conductivitate electrică de tip n ~~ãT= ~ ^ivJp - #p + p' Această ecuație arată cum și din ce motive se modifică concentrația găurilor în timp În primul rând, concentrația de găuri se poate modifica datorită existenței divergenței curentului

găurii, care ia în considerare primul termen În al doilea rând, concentrația de găuri se poate modifica datorită recombinării lor, care ia în considerare al doilea termen (Rp este rata de recombinare) Același termen, în funcție de semn, poate ține cont de modificarea concentrației de găuri din cauza generării termice În al treilea rând, concentrația găurii se poate modifica din cauza generării netermice (ionizare prin impact, ionizare sub acțiunea luminii etc) În acest caz Gp= Ținând cont de ipotezele făcute la începutul secțiunii, rescriem ecuația de continuitate ( ) după cum urmează: drp dJr rp rpo dt q dxτρ Folosim ecuația ( ) pentru densitatea curentului de găuri, simplificând-o și ținând cont de ipotezele făcute: După înlocuirea ( ) în ( ), avem drp p d rp rp - rpo dt p dx τρ (,) (,) (,) adică, se obține o ecuație diferențială de ordinul doi a derivatelor parțiale Pentru a o rezolva, sunt necesare condiții inițiale la limită În si Condiții de frontieră La curenți scăzuti, concentrația purtătorilor de sarcină minoritari în baza de lângă joncțiunea pn este determinată de relația ( ): P'( ) = Pyaoexp Înlocuind aici valoarea tensiunii ( ), obținem la X = Pπ( ) = Pnoexp + t^exp/ω/) - = pn (exp-|y-)exp(-φ-exp> ( ) Argumentul celui de-al doilea exponent este mic Prin urmare, poate fi extins într-o serie, limitându-se la primii doi dintre membrii săi: exp/y " + Y Apoi ( ), ținând cont de extinderea într-o serie, ia forma pn( ) = pnexp + pl (exp-^-)-^-exp/w/ (,) Astfel, concentrația purtătorilor de sarcină minoritari în baza de lângă joncțiunea p-n are o componentă constantă și o componentă variabilă Frecvența de schimbare a componentei variabile este aceeași cu frecvența tensiunii alternative aplicate Dacă tensiunea alternativă nu ar fi mică, atunci componenta alternativă a concentrației purtătorului ar avea armonici de ordin superior cu o frecvență care este un multiplu al ω A doua condiție la limită rezultă din idealitatea tranziției ohmice, adică pentru x = Wn pn(Wn) = ppo (,) Formular de soluție Pentru a transforma ecuația diferențială ( ), alegem forma soluției sub forma sumei componentelor constante și variabile ale concentrației, adică o formă similară cu forma condiției la limită ( ) Acest lucru se datorează liniarității ecuației pentru concentrația purtătorilor de sarcină, astfel încât nu pot apărea noi armonici Atunci soluția ecuației diferențiale ( ) trebuie să aibă forma pn(x, /) = Pn + Δρη(χ) + pl(x)exp/co/, ( ) unde pn(x\/) este concentrația totală a purtătorilor de sarcină minoritari în bază; Δρη(χ) este componenta constantă a concentrației în exces de purtători minoritari, care depinde doar de coordonată; pl(x)exp/co/ este componenta variabilă a concentrației în exces a purtătorilor de sarcină minoritari, care depinde atât de coordonată, cât și de timp Astfel, componenta constantă din ( ) este reprezentată ca suma dintre concentrațiile de echilibru și excesul Transformarea ecuației diferențiale generale După înlocuirea formei alese de soluție ( ) în ( ), obținem ρη(χ)/ωεχρ/ω/ = Dp q + Dn q exp/ω/ - Δρη(χ) Pπ exp/-sh/ (з,i) Tp τρ Această ecuație are termeni care depind și nu de timp Ecuația este valabilă numai dacă sumele algebrice ale componentelor independente de timp și dependente de timp separat sunt egale cu zero Prin urmare, pentru componenta constantă a concentrației în exces, din ( ) obținem ri [Dpn(x)] = Δρη(χ) (,) d X Lp Unde Lp = DpTp Condiții limită pentru componenta constantă a concentrației în exces: pentru X = pentru x=Wn Apn(Wn) = (,) Pentru componenta variabilă a concentrației în exces ά Pη{χ) pn(x) (,) Unde l - \p = V + /ωτρ Scriem condițiile la limită pentru componenta variabilă a concentrației în exces pe baza condițiilor la limită generale ( ) și ( ): x = sau in sfarsit pn( ) = pn (exp -^y-) -^y - ; pentru X = Wn Pn(Wn) = o Ecuațiile rezultate

pentru curentul constant și variabil sunt similare, astfel încât o singură soluție poate fi (,) (,) alcătuirea acestora Soluție pentru componenta constantă a concentrației în exces de purtători minoritari în bază Soluția ecuației diferențiale ( ) este căutată convenabil sub forma Δρη(χ) = Λ|cш-^- + ^ sh-^- (,) Lp Lp Acest tip de soluție simplifică căutarea constantelor arbitrare, dacă sunt date condiții pe granițe și, în același timp, zero pe o limită Înlocuind x = în ( ) și ținând cont de condiția la limită ( ), obținem Δρ"( ) = /?po(exp -) = Ai Luând în considerare condiția la limită ( ) și valoarea constantei de integrare Ai la x = Wn bPn(Wn) = = p"o(exp)ch + sh -p- Prin urmare, ^=-^°(exp^ l)cth¿p Înlocuind în ( ) valorile constantelor de integrare, obținem în final Δρη(χ) = p"o(exp-^ l)(ch-y cth-p-sh-ts) ( ) Aceasta este distribuția componentei constante a concentrației în exces a purtătorilor de sarcină minoritari în baza diodei la diferite tensiuni § CALCULUL CONSTANTELOR CURENȚI care trec prin diodă și asociați cu injectarea și extracția purtătorilor ÎNCĂRCA Pentru a determina componenta găurii a densității de curent într-o secțiune arbitrară a bazei diodei, folosim relațiile ( ) și ( ) După diferențiere, obținem (sh - etb ch) (exp Æ( ) Aceasta este densitatea curentului continuu în diferite părți ale bazei diodei La X = , adică la limita bazei cu joncțiunea pn, componenta de găuri a densității curentului prin joncțiune /p(O) = ^^cth-^(exp-^) (,) În mod similar, puteți scrie componenta electronică a densității curentului prin joncțiunea diodei, adică prin granița dintre regiunea p și joncțiunea p-n: /n(')=- ^-cth-^ (exp-^) (,) Pentru practică, cunoașterea densității totale de curent, adică suma componentelor electronului și a găurilor, prezintă un interes mai mare Este necesar să rezumați densitățile de curent în aceeași secțiune Totuși, calcularea curentului purtătorilor majoritari de sarcină din bază ar necesita utilizarea unei tehnici diferite în comparație cu metoda de calcul a curentului purtătorilor minoritari Prin urmare, folosim presupunerea că procesele de generare și recombinare a purtătorilor nu au loc în joncțiunea pn În consecință, componentele densităților de curent (electron și gaură) sunt aceleași pe ambele părți ale joncțiunii Acum puteți determina densitățile de curent ale purtătorilor de sarcină minoritari de pe ambele părți ale joncțiunii p-n și să le adăugați: / = /do) + /n(O') = q(-^- cth cth X \ LpLnLn J x(exp-^ l) (,) Valoarea celui de-al doilea factor din ( ) este determinată de parametrii regiunilor semiconductoare de pe ambele părți ale joncțiunii pn și de grosimea acestor regiuni Produsul primilor doi factori, care este independent de tensiune, se numește densitatea curentului de saturație: /us = çf-P^cth-^ + ^^cth-^ï ( ) X Lp LnLn J Strict vorbind, acest curent nu este complet și nu este întotdeauna saturat, deoarece grosimea bazei diodei depinde de tensiune datorită modificării grosimii joncțiunii p-n cu o modificare a tensiunii aplicate Astfel, CVC-ul unei diode este de obicei scris ca / = /us (exp -) (,) Reprezentarea grafică a CVC este prezentată în fig Pentru comoditate, scalele tensiunilor directe și inverse, precum și curenții continui și inversi, sunt alese diferite § CAZURI SPECIALE DE CALCUL A DISTRIBUȚIEI PORTATORILOR MINORITARI ȘI CURENTUL DE SATURAȚIE Pentru a obține expresii și mai simple și pentru a înțelege mai bine semnificația rezultatului, luăm în considerare cazurile speciale limitative ale diodelor cu o bază groasă și subțire O diodă cu bază groasă este o diodă a cărei grosime a bazei este mult mai mare decât lungimea de difuzie a diodelor minoritare purtători de sarcină (Wn^> Lp) Pentru cealaltă regiune a diodei, datorită dopajului său intens, această inegalitate este cu atât mai adevărată, adică de ex Wp ¿n-

Atunci argumentele cotangentelor hiperbolice în relația ( ) sunt mult mai mari decât unitatea, iar cotangentele hiperbolice în sine sunt apropiate de unitate: cth-^i și cth-^ bp Ln Folosind formulele lui Euler = -y - I, din relația ( ) obținem distribuția excesului de concentrație a purtătorilor de sarcină minoritari în baza unei diode cu o bază groasă: Δρη(χ) = pn (exp -)exp(- -θ (,) În consecință, la o diodă cu bază groasă, valoarea absolută a excesului de concentrație a purtătorilor minoritari în bază (Δρη = ρη - plo) scade exponențial odată cu creșterea distanței de la joncțiunea pn (Fig) Pentru tensiunile directe, concentrația în exces este pozitivă, ceea ce corespunde injectării purtătorilor minoritari în bază La tensiuni inverse, concentrația în exces este negativă, adică Pn ¿ ¿/=¿ U kT/q sau |í/ P|> , V, nu se modifică cu tensiunea (Fig) Aceeași concluzie poate fi trasă dacă ne imaginăm distribuția purtătorilor minoritari în baza unei diode de bază groase la tensiuni inverse diferite (Fig) Cu o creștere a tensiunii inverse în valoare absolută și, în consecință, cu o creștere a grosimii joncțiunii pn -al-lea I /"Z I g - - inss WL Rpo! ^>> h \ jAjWtwl O Orez Ramuri inverse CVC de diode cu o bază groasă și subțire, ținând cont de extragerea purtătorilor de sarcină minori din regiunile adiacente joncțiunii p-n Orez Distribuția concentrației purtătorilor minoritari de sarcină în baza diodei la diferite tensiuni inverse, explicând invarianța curentului invers (curent de saturație) într-o diodă cu o bază groasă în timpul extragerii purtătorilor minoritari datorită grosimii bazei, curbele de distribuție ale concentrației purtătorilor de sarcină minoritari se deplasează mai adânc în bază la un gradient de concentrație constant lângă joncțiunea p-z, care, conform relației ( ), corespunde unui curent constant Expresia ( ) este similară expresiei ( ) obținută din considerații pur fizice, deoarece L =]/Ί τ În conformitate cu ( ), lungimea caracteristică care determină proprietățile și mulți parametri ai unei diode cu o bază groasă este lungimea de difuzie a purtătorilor de sarcină minoritari în baza diodei O diodă cu bază subțire este o diodă a cărei grosime a bazei este mult mai mică decât lungimea difuziei purtătorului minoritar (Wn^Lp) În acest caz, argumentele tuturor funcțiilor hiperbolice din relația ( ) vor fi mici (mai puțin de unul) Prin urmare, atunci când extindem funcții hiperbolice într-o serie, ne putem limita la un singur termen al expansiunii (cthy " /y, shp " y\ chpæ) Apoi, pentru distribuția concentrației purtătorilor minoritari într-o diodă cu bază subțire, din ( ) obținem Δρn(χ) = pn (exp -)(- - ^-) (,) Prin urmare, într-o diodă cu o bază subțire, concentrația purtătorilor minoritari de sarcină scade liniar cu distanța de la joncțiunea pn (Fig) Cu alte cuvinte, de exemplu, pentru o diodă cu o joncțiune p + -n asimetrică, densitatea de curent în orice secțiune a bazei este neschimbată în conformitate cu ( ) și ținând cont de ( ), adică recombinarea de minore purtătorii de încărcare din bază este nesemnificativ Toți purtătorii de sarcină minoritari injectați în bază la o tensiune directă ajung la joncțiunea ohmică, unde se recombină Cu o tensiune inversă prin joncțiunea p-m a unei diode cu o bază subțire, toți purtătorii de sarcină alimentați la bază printr-un contact neredresator sunt extrași Densitatea curentului de saturație într-o diodă cu bază subțire din relația generală ( ), ținând cont de expansiunea într-o serie de funcții hiperbolice Această expresie pentru densitatea curentului de saturație poate fi obținută și pe baza faptului că curentul invers se datorează doar difuzării purtătorilor de sarcină minoritari de la tranzițiile ohmice la joncțiunea p-m de-a lungul regiunilor adiacente tranziției Prin urmare, pentru a calcula

densitatea curentului de saturație, este necesar să folosiți termenii doi din ( ) și ( ) sau relațiile ( ) și ( ) În acest caz, gradienții de concentrație ai purtătorilor minoritari în regiunile n și p pot fi determinate ca pno / ^n și Pro / C / p (Fig) Astfel, într-o diodă cu o bază subțire, densitatea curentului de saturație depinde de tensiunea inversă, deoarece la o modificare a tensiunii inverse, grosimea bazei (Wn sau Wp) se modifică și datorită unei modificări a grosimii joncțiunii p-m (vezi Fig) Aceeași concluzie poate fi trasă dacă ne imaginăm distribuția purtătorilor de sarcină minoritari în baza unei diode cu o bază subțire la diferite tensiuni inverse (Fig) Odată cu o creștere a tensiunii inverse în valoare absolută, are loc o modificare a gradientului de concentrație al purtătorilor de sarcină minoritari în bază, adică o tranziție ohmică (o sursă de non-bază) Orez Distribuția concentrației purtătorului minoritar în baza unei diode cu bază subțire la diferite tensiuni Orez Distribuția concentrației purtătorului minoritar în baza diodei la diferite tensiuni inverse care explică creșterea curentului invers într-o diodă cu bază subțire noi purtători de sarcină în acest caz) cu cât afectează mai puternic curentul invers, cu atât este mai aproape de joncțiunea pn În conformitate cu ( ), lungimea caracteristică care determină proprietățile și mulți parametri ai unei diode cu o bază subțire este grosimea bazei diodei § CALCULUL CURENTILOR ALTERNATI SI CONDUCTIVITATEA TOTALA A DIODEI În legătură cu analogia ecuațiilor diferențiale pentru distribuția componentelor constante și variabile ale concentrației purtătorilor minoritari ( ) și ( ), precum și în legătură cu analogia condițiilor la limită ( ) și ( )), ( ) și ( ), putem scrie imediat expresia pentru componenta variabilă a densității de curent prin diodă Pentru a face acest lucru, este suficient să faceți următoarele înlocuiri: în loc de L, înlocuiți A = (,) / + /ωτ în loc de (exp-|y-) înlocuiți (exp-|y-) ^m'* Ca rezultat, obținem o expresie pentru componenta variabilă a densității curentului, similară cu expresia ( ): jm= ^(-!Z¥^cth ^+-^£r^-cth-^)exp -· (,) kT \ Ar Ap Λ" ι\η J kT Se poate observa că componenta variabilă a densității de curent prin diodă este liniar legată de tensiunea alternativă dacă această tensiune este mică (vezi §) Rezultă că pentru a descrie proprietățile unei diode, este recomandabil să se folosească tehnica obișnuită de inginerie electrică - pentru a introduce conductivitatea totală (sau impedanța) diodei pentru curent alternativ: Ÿ = lm/Om = SJ t/Ù sh Atunci pentru diodă, folosind ( ), putem scrie ¿-P^ L-cth-^+-^-cth-Ș£-)exp-^- (,) Ri \ \p \pÆnZKl Expresia rezultată vă permite să calculați conductivitatea unei diode semiconductoare la orice frecvență și pentru orice raport între dimensiunile diodei și lungimea difuziei După cum se poate observa din ( ), conductivitatea diodei pentru curent alternativ se dovedește a fi complexă Scriem conductivitatea diodei sub forma K - - + / L și pentru două intervale de frecvență (sus si jos)) WL, frecvențe joase Condiția W^>L înseamnă că argumentele cotangenților hiperbolici din ( ) sunt mari Prin urmare, cth (y-]/ + /ωτ Acum rămâne de transformat relația ( ) Transformarea acestei relații se dovedește a fi simplă dacă ωτ £, frecvențe înalte Criteriul de înaltă frecvență ωτ^> , adică încălcarea condiției de frecvență joasă În același timp, ca și înainte, cth^-y- / + /ωτ) æ Acum trebuie să transformăm ( ) ținând cont de frecvența înaltă Pentru a extrage rădăcina, este convenabil să folosim condiția ωτ Apoi, aplicând formula De Moivre, obținem / + /ωτ w //ωτ = /cos ° + /coTsin ° = adică d°)= /ωτ(-^H-/ /o)t(cos o + / sin Prin urmare, conductivitatea totală a diodei + / -|y- (,) Apoi Q S l/ ω (PnoDp }/τρ i tipoDri]/τη QU r ~ kT V TA Lp Ln ΛΧP kT ' (,) Dacă pno npo, sau npo " Rpo, sau τρ = τη

= τ, atunci expresia conductivității active = qS i/ωτ I pvP r kT Y us P kT ' T e Comparând ( ) și ( ), obținem (,) (,) În mod similar, comparând părțile imaginare ( ) și ( ), avem - (,) ωτ (Sdif) HF (J "h Las) F ω - (Odif) LF Constanta de timp în acest caz ''S, dif = /(o (,) confirmă că defazarea dintre curent și tensiune este π/ Același lucru se poate concluziona din egalitatea părților reale și imaginare ale conductivității totale a diodei ( ), i e φ \u d arctan \u d arctan \u d °) W) duce la faptul că argumentele cotangenților hiperbolici din ( ) vor fi mici Micimea argumentului cotangentei hiperbolice este aceea că vom lua în considerare condiția de joasă frecvență, adică criteriul de joasă frecvență în acest caz Folosind această condiție, extindem cotangenta hiperbolică într-o serie Dacă ne limităm la un singur termen al seriei, așa cum sa făcut în § , atunci componenta imaginară va dispărea în expresia pentru conductivitate Prin urmare, luăm doi termeni ai seriei pentru a nu pierde efectul de interes pentru noi Apoi ~ L 'W cth~m sau ,, U Λ /, w r \ r \ ωτ ?-)· (,) În expresia rezultată, termenul W /(L) este neglijabil în comparație cu unitate Deși și termenul imaginar este mic față de unitate, nu poate fi neglijat, din nou, pentru a nu pierde valoarea componentei imaginare de conductivitate care ne interesează Această abordare duce la o eroare în componenta reală de conductivitate Eroarea se dovedește a fi de ordinul lui W /k?, ceea ce, desigur, este nesemnificativ, deoarece W , rezistența scade invers proporțional cu rădăcina pătrată a frecvenței Capacitate de difuzie Cdif Capacitatea de difuzie a unei diode cu bază groasă nu depinde de frecvența la ωτ L ωτ"í \ωτ^ I eu ! η I ? \W"L eu eu ! Eu ^ZI eu JL Orez Dependențe de frecvență ale rezistenței active (a), capacității de difuzie (b) și constantei de timp (c) ale diodelor cu baze subțiri și groase În intervalul de frecvență când -jj- ωτ , capacitatea de difuzie este invers proporțională cu rădăcina pătrată a frecvenței La frecvențe înalte, constantele de timp ale oricărei diode trebuie să fie egale între ele și egale cu l / ω în conformitate cu ( ), prin urmare, în fig , a, b segmentele egale sunt marcate în domeniul de înaltă frecvență Constante de timp gSDIf Construcția graficelor pentru constanta de timp decurge din cele două construcții anterioare La frecvențe joase, constanta de timp a unei diode cu bază groasă este mult mai mare decât cea a unei diode cu bază subțire [cf (,) și (,)] La frecvențe înalte, constantele de timp ale acestor diode sunt aceleași (Fig , c) § SENSUL FIZIC PARAMETRII DIODEI Valori de frecvență joasă Rezistența diodei r este pur și simplu rezistența diferențială a diodei, adică rezistența diodei la un curent alternativ mic la o polarizare constantă Pentru a verifica acest lucru, este necesar să se diferențieze expresia pentru CVC-ul diodei ( ) și comparați cu ( ): - -exp- ^- -Í/ -/ Ì dU ~ kT /nasehr kT ~ kT Inas) ~ g ■ Capacitatea de difuzie este de obicei asociată cu o modificare a sarcinii purtătorilor injectați cu o modificare a tensiunii pe diodă Într-adevăr, purtătorii injectați există de ceva timp în regiunile diodei adiacente joncțiunii p-n Când tensiunea se schimbă, o parte din purtătorii minoritari acumulați se pot întoarce la joncțiunea p-/r și trece prin aceasta în regiunea vecină Curentul rezultat este similar cu curentul capacitiv Cu toate acestea, acest lucru necesită unele clarificări și completări Ideea este că în timpul injectării, regiunile adiacente joncțiunii p-m rămân neutre, adică nu apare nicio sarcină totală în ele Neutralizarea taxelor are loc datorită apropierii transportatorilor majoritari de regiunile în care au fost injectați transportatorii minoritari Neutralizarea se stabilește într-o perioadă foarte scurtă de timp - de

ordinul timpului de relaxare Maxwellian sau dielectric (de obicei - IO-s) Deoarece concentrația purtătorilor principali este relativ mare și cantitatea lor necesară este completată printr-un contact nerectil, neutralizarea este aproape completă Trebuie remarcat faptul că nu numai sarcina medie pe întreaga regiune este neutralizată, ci și sarcina în fiecare punct, adică este îndeplinită condiția de neutralitate electrică locală În ciuda faptului că regiunile adiacente joncțiunii p-m nu sunt încărcate în timpul injecției, capacitatea de difuzie poate fi legată de sarcina purtătorilor injectați, deoarece purtătorii minoritari injectați și purtătorii majoritari care îi neutralizează nu dispar Pentru comparație, amintiți-vă că un condensator obișnuit în ansamblu este neutru din punct de vedere electric Dar într-un condensator obișnuit, sarcinile pozitive și negative sunt separate spațial (același lucru se poate spune despre joncțiunea p-m când luăm în considerare capacitatea de barieră), în timp ce cu injecțiile prin joncțiunea p-n, atât sarcinile pozitive, cât și negative sunt în aceeași regiune și nu sunt separate spațial, drept urmare este imposibil să se detecteze regiunea în care trec curenții de polarizare Prin urmare, capacitatea de difuzie poate fi legată de modificarea sarcinii purtătorilor minoritari injectați, dar nu poate fi legată de trecerea curenților de polarizare Aceasta este diferența fizică esențială dintre capacitatea de difuzie și capacitatea de barieră a joncțiunii pn și de capacitatea unui condensator convențional Capacitatea de difuzie poate fi reprezentată astfel: Cdif = I^eng eff/^I, ( ) unde ¿(Zinj ef este valoarea efectivă a sarcinii injectate Aici, valoarea absolută a raportului este luată pentru a evita confuzia datorită regulii semnului pentru tensiune și, de asemenea, datorită faptului că sarcina injectată poate fi fie pozitivă, fie negativă Valoarea efectivă a sarcinii injectate trebuie luată deoarece, din cauza naturii distribuite a acestei sarcini, nu participă toate în mod egal la formarea unei capacități Deci trebuie făcut un fel de medie Pentru a vă asigura că această definiție nu contrazice valorile obținute anterior ale capacității de difuzie, se poate găsi valoarea \ dQUHX/dU\, unde k == -|- / ρθ^η)^θXP ~^τ Și i/Ch = il (pπ°ѢP + n₽ ¿")exP -feF- ( ) Expresia rezultată diferă de expresia pentru capacitatea de difuzie a unei diode cu o bază groasă ( ) printr-un factor relativ mic , care poate fi atribuit medierii Prin urmare, pentru o diodă cu o bază groasă fEng EF = - - O o) Diodă cu bază subțire Pentru o diodă cu o bază subțire, distribuția excesului de concentrație de găuri în regiunea n corespunde expresiei ( ) O expresie similară se va aplica și distribuției excesului de concentrație de electroni injectați în regiunea p După integrare, obținem Comparație ( ) cu constanta de timp a unei diode cu bază subțire ( ) confirmă că este determinat de timpul de zbor al purtătorilor de sarcină minoritari prin baza diodei * Valori de înaltă frecvență Valorile de înaltă frecvență ale rezistenței și capacității de difuzie a diodei sunt caracterizate prin dependența lor de frecvență Acest lucru limitează foarte mult utilizarea unor astfel de parametri ai diodei, deoarece face dificilă calcularea răspunsului în frecvență al circuitelor care utilizează diode semiconductoare Această dependență de frecvență a apărut deoarece sistemul distribuit (diodă la frecvență înaltă) a fost reprezentat de un model de diodă concentrată, ceea ce este nefericit pentru frecvențele înalte De aici rezultă că este imposibil să se caute semnificația fizică a parametrilor de înaltă frecvență ai unei diode semiconductoare Ele ar trebui considerate formale § LIMITE DE APLICABILITATE A CAZURILOR SPECIALE DE CALCUL AL PARAMETRILOR DIODEI

Calculele anterioare au fost date pentru cazuri speciale de diode cu baze groase și subțiri, la frecvențe joase și înalte Cu toate acestea, expresiile rezultate cu erori relativ mici pot fi folosite aproape întotdeauna Pentru a vedea acest lucru, să ne uităm la erorile care pot apărea din diverse motive Dimensiunile bazei diodei Cazuri speciale de grosime a bazei și W L, ținând cont de ( ) și ( ), obținem /râu Atò kT / qU λ /eng ntL ?(φKOH-U) eXPk kT) Raportul dintre curentul de recombinare și curentul de injecție depinde de banda interzisă a semiconductorului La diodele realizate dintr-un material cu bandgap mare (dioda de siliciu), injectarea este dificilă din cauza înălțimii mari a barierei de potențial Prin urmare, curentul direct la tensiuni directe joase va fi determinat de curentul de recombinare § PAUZĂ DE AVALANȘĂ Mecanismul de defalcare a avalanșelor și definițiile de bază Tensiunea inversă aplicată unei diode scade de obicei peste joncțiunea electrică de redresare a diodei La tensiuni inverse mari pentru o anumită diodă, are loc o defecțiune a joncțiunii electrice de redresare Defalcarea joncțiunii electrice de redresare (și, în consecință, defalcarea diodei) este un fenomen de creștere bruscă a conductibilității diferențiale a joncțiunii de redresare atunci când tensiunea inversă atinge o valoare critică pentru acest dispozitiv În funcție de fenomenele fizice care duc la avarie, apar avalanșe, tuneluri și defecțiuni termice Orez avalanșă pentru diferite temperaturi O defecțiune de avalanșă a unei joncțiuni electrice de redresare este o defecțiune cauzată de o multiplicare avalanșă a purtătorilor de sarcină sub acțiunea unui câmp electric puternic Înmulțirea în avalanșă a purtătorilor de sarcină are loc ca urmare a faptului că, trecând printr-o joncțiune de redresare la tensiune inversă, aceștia dobândesc energie suplimentară într-un câmp electric puternic pe calea liberă medie, suficientă pentru a forma noi perechi electron-gaură de purtători de sarcină prin ionizarea prin impact a atomilor semiconductori Procesul de ionizare prin impact este caracterizat prin coeficienții de ionizare prin impact an și ap (vezi §), care depind în mare măsură de puterea câmpului electric Prin urmare, coeficienții de ionizare de impact pentru electroni și găuri sunt de obicei considerați egali Pentru a caracteriza cantitativ creșterea curentului datorată procesului de ionizare prin impact în joncțiunea de redresare, se introduc coeficienții de multiplicare a avalanșei Mn și MPi, care arată de câte ori crește curentul acestor purtători ca urmare a ionizării prin impact Cu alte cuvinte, factorul de multiplicare a avalanșei este raportul dintre curentul acestor purtători de sarcină (de exemplu, electroni) care părăsesc joncțiunea de redresare și curentul acelorași purtători care intră în joncțiune În legătură cu ipoteza egalității coeficienților de ionizare de impact, se obține automat egalitatea coeficienților de multiplicare a avalanșei: Mn = Mp = m diodă care caracterizează fenomenul de pro- ^προδ unpoõ DESPRE CVC al diodei la În sfârșit, parametrul defalcarea tranziției sale de redresare este tensiunea de rupere a diodei - tensiunea la care are loc o creștere nelimitată a curentului (Fig) Formal, la tensiunea de avarie M-^oo În condiții de producție, tensiunea de defalcare a unei diode este determinată de valoarea tensiunii inverse care provoacă defectarea joncțiunii de redresare, la care curentul invers atinge o valoare predeterminată Relația dintre coeficientul de multiplicare a avalanșei și coeficientul de ionizare de impact și derivarea stării de defectare a avalanșei De obicei, o joncțiune pn este folosită ca joncțiune de redresare în diferite diode Prin urmare, vom lua în considerare în continuare defalcarea avalanșei pentru joncțiunea p-n

Pentru a calcula conexiunea parametru care caracterizează procesul fizic - coeficientul de ionizare de impact - cu parametrul care caracterizează tranziția p-n în timpul ionizării de impact - coeficientul de multiplicare a avalanșei - folosim ecuația de continuitate, de exemplu, pentru electroni, care are o formă similară cu ecuația de continuitate pentru găuri (,): = divZn-Rn + Gn (,) Dacă, când luăm în considerare procesul constant de ionizare prin impact (dn/dt = O), neglijăm recombinarea în joncțiunea pn la o tensiune inversă mare pe diodă (?L =), atunci ecuația de continuitate pentru unidimensională modelul diodei ia forma (,) dJ η Ti ~ - U n ' q dx În acest caz, rata de generare netermică a electronilor (Gn) ia în considerare generarea lor sub acțiunea unui curent electric puternic camp Rata de generare netermică este numeric egală cu numărul de purtători formați pe unitatea de timp pe unitatea de volum Pentru a exprima rata de generare netermică în termeni de coeficienți de ionizare de impact, luați în considerare un volum unitar având o lungime în direcția de trecere a purtătorilor de sarcină și o suprafață a secțiunii transversale egală cu unitatea Apoi fiecare purtător care trece prin acest volum formează un număr de purtători într-o unitate de volum egală cu coeficientul de ionizare a In editie- Orez Densitățile electronilor și ale curenților de găuri în timpul înmulțirii avalanșei într-o joncțiune u+-p asimetrică Numărul de purtători egal cu J/q trece prin volumul luat în considerare Prin urmare, dacă luăm în considerare generarea de electroni (sau găuri) ca urmare a ionizării atomilor de către electroni și găuri, obținem Gn = G,, = α-+)=J\ JP = JP(O)=O; pentru χ'=δ Jn = Jn(Jfy Jp = Jp(n>) Ținând cont de raționamentul de mai sus, ecuația ( ) ia forma sau -dJ n = clMJ n(ô)dx\ ( ) La integrarea ecuației diferențiale ( ), este necesar să se convină asupra limitelor integrării folosind condițiile la limită ( ), care sunt prezentate clar în Fig Apoi MJn(ò) o - dJn = MJn( )țadx W o sau despre - MJp(&) "T Jη(δ) = MJp(&) § adx δ Ca urmare δ \ țadx ( ) DESPRE Relația ( ) reflectă relația dintre coeficientul de multiplicare a avalanșei și coeficientul de ionizare de impact În timpul ruperii joncțiunii pn, coeficientul de multiplicare a avalanșei este M-> oo Apoi δ $adx=l (,) O Ecuația ( ) este condiția pentru ruperea avalanșă a joncțiunii pn Calcularea coeficientului de multiplicare a avalanșei și a tensiunii de rupere în timpul defalcării avalanșei unei tranziții ascuțite electron-gaură Distribuția intensității câmpului electric într-o joncțiune n+-p asimetrică ascuțită este liniară ( ), iar practic întreaga regiune a sarcinii spațiale este situată în regiunea ușor dopată a semiconductorului ( ) Apoi, în conformitate cu ( ) și ținând cont de modificarea originii acceptate (δ"δρ) |£| =-ί^(δ - x) εε Ținând cont de relația dintre coeficienții de multiplicare a avalanșei și ionizarea la impact ( ) și luând aproximarea dependenței coeficientului de ionizare de impact de intensitatea câmpului electric ( ), obținem Ò Ô n(g^gr y p -+ \ εε / t + (,) Să substituim în ultima expresie relația pentru grosimea unei joncțiuni pn asimetrice ascuțite ( ), în care putem neglija valoarea diferenței de potențial de contact față de tensiunea inversă (φ^ H oo De aceea t -]- t -]- - F~rFF)" (tY)~(,) Împărțind ( ) la ( ), obținem t - - / M \u d (t / / t / προ) τ e - (íVi/probe) M sau (,) M = - - (¿//í/prob) ' unde b \u d (m +) / este un coeficient care este diferit pentru diodele din diferite materiale (b \u d) Pentru U Λί , pentru ¿ ¿Vprob M oo (Fig) Din expresia ( ) tensiunea de avarie în timpul defectării avalanșei h \ mostre ,n~ ~ A sau ^ mostre A (,) w -d i Nap Aici, expresia dintre paranteze pătrate include doar cantități care pot fi considerate constante pentru un

anumit material Apoi, introducând o nouă notație, obținem Uptest > Orez Dependenţa factorului de multiplicare a avalanşei de tensiunea la joncţiunea pn (,) unde N este concentrația de impurități în regiunea ușor dopată, adică în baza diodei; k = (m -)/(m +) Experimentele confirmă relația ( ) În sistemul de coordonate Ig Í npo din Ig N, punctele experimentale se află pe o dreaptă (Fig , a) În acest caz, pentru joncțiunile p-n asimetrice p+-n și n+-p formate în același semiconductor, dependențele Acest fapt experimental demonstrează validitatea ipotezei de egalitate a coeficienților de ionizare de impact pentru electroni și găuri, care a fost acceptată la începutul acestei secțiuni Cu toate acestea, cel mai adesea nu se cunoaște concentrația de impurități în baza diodei, ci rezistivitatea acesteia, adică rezistivitatea rezistența semiconductorului original De aceea; ținând cont de relația dintre concentrația de impurități sau concentrația purtătorilor majoritari și rezistivitate, este mai convenabil să scrieți relația ( ) sub forma and samples = In Qa (,) Pentru joncțiuni p+-n siliciu, ¿/prob = ρ , ; pentru n+-p-tranziții ^prob = p , ; n+-p-tranziții ¿/sondă = ρ , , unde ρ este rezistivitatea bazei, Ohm-cm GaAs ✓ / CeSi ✓ * IO' V ,cm' A) Orez Dependența tensiunii de rupere în timpul defalcării avalanșei de concentrația de impurități în baza diodei cu o joncțiune pn ascuțită asimetrică (a) și de gradientul de concentrație de impurități într-o joncțiune pn netedă (b) Coeficienții empirici Via sunt diferiți nu numai pentru diodele din materiale diferite, ci și pentru diodele din același material cu joncțiuni pn ascuțite diferite (p+-p și p+-p) Această diferență a coeficienților este legată de faptul că mobilitatea electronilor diferă de mobilitatea găurilor din același material Astfel, tensiunea de rupere a joncțiunilor p-n asimetrice ascuțite este determinată de concentrația de impurități din regiunea ușor dopată sau de rezistivitatea acesteia, deoarece grosimea joncțiunii p-n depinde de aceste cantități Grosimea tranzițiilor netede pn depinde de gradientul de concentrație a impurităților ( ) Prin urmare, tensiunea de defalcare a tranzițiilor netede pn este determinată de gradientul de concentrație a impurităților (Fig) Pe măsură ce temperatura crește, calea liberă medie a purtătorilor de sarcină scade și, prin urmare, energia pe care o poate dobândi un purtător de sarcină pe calea liberă medie într-un câmp electric Prin urmare, o creștere a temperaturii duce la o creștere a tensiunii de avarie în timpul defectării avalanșei (vezi Fig) Particularități ale defalcării avalanșei în joncțiunile electron-gaură cu defecte Tranzițiile electron-gaură ale diodelor reale au adesea diverse defecte: perturbări ale rețelei cristaline, incluziuni străine etc Astfel de neomogenități, indiferent de natura lor, duc la încălcări ale modelului câmpului electric, la apariția unor regiuni cu putere crescută În acele locuri în care intensitatea câmpului electric este mai mare, se dezvoltă o defecțiune După ce se dezvoltă defectarea, în regiunea defectului se formează un filament cu conductivitate specifică crescută Cu toate acestea, datorită secțiunii mici a cordonului, o așa-numită rezistență mare de răspândire este conectată în serie cu aceasta, concentrată în zonele adiacente tranziției (Fig) Prin urmare, curentul în timpul defalcării avalanșei prin defecte este limitat de o rezistență mare la răspândire Orez CVC al diodei în timpul defectării prin defecte Orez Distorsiunea liniilor de curgere și echipotențialelor în joncțiunea p-n și în zonele adiacente asociate cu un defect conductiv în joncțiunea p-n Datorită faptului că numărul de defecte diferite în joncțiunea p-l poate fi mare și sunt cumva distribuite statistic în funcție de proprietățile lor, o defalcare în fiecare

dintre ele duce la o anumită creștere a curentului prin diodă Astfel, în cazul unei ruperi de avalanșă a joncțiunii p-n de-a lungul defectelor, se obține o ramură inversă "moale" a CVC (Fig) Fenomenul de defalcare a avalanșei prin defecte este aparent legat și de faptul că datele experimentale privind tensiunile de avalanșă și coeficienții de multiplicare a avalanșei sunt obținute cu o împrăștiere mare § DETERMINAREA TUNELULUI Utrial Utrial despre - eu ! eu eu eu '> Orez CVC al unei diode în timpul defecțiunii tunelului pentru diferite temperaturi Defalcarea prin tunel a unei joncțiuni p-n se numește o defecțiune electrică a tranziției, cauzată de tunelarea mecanică cuantică a purtătorilor de sarcină prin banda interzisă a unui semiconductor fără modificarea energiei acestora (vezi Fig) Tunnelarea electronilor este posibilă cu condiția ca lățimea barierei de potențial Δ, care trebuie depășită de electroni, să fie suficient de mică Pentru aceeași bandă interzisă (pentru același material), lățimea barierei potențiale este determinată de intensitatea câmpului electric, adică de panta nivelurilor și benzilor de energie (vezi Fig) În consecință, condițiile pentru tunelare apar numai la o anumită intensitate a câmpului electric sau la o anumită tensiune la joncțiunea p-n - la o tensiune de rupere Valoarea acestei intensități critice a câmpului electric este de aproximativ - V/cm pentru joncțiunile din siliciu și x (g V/cm pentru cele cu germaniu Deoarece Deoarece probabilitatea tunelării depinde foarte mult de intensitatea câmpului electric, atunci în exterior efectul de tunel se manifestă ca o defalcare a diodei (Fig) Să luăm în considerare, ca exemplu, calculul tensiunii de ruptură în timpul ruperii tunelului a unei joncțiuni p-n ascuțite apropiate de simetrică Cea mai mare valoare a intensității câmpului electric într-o astfel de tranziție există la contactul metalurgic [vezi § și, în special, formula ( )], adică pentru x = IFI - qNap cu jC max -Un RR l k Folosind ecuația ( ), obținem \E I max Ç Nar Mdl εεο N ar + N jan Ținând cont de relația ( ), pentru grosimea unei joncțiuni pn ascuțite, obținem La E, Prin urmare /? ç WapAGin ζr/\ Γ max - τ: :- ττ (fkon - UI εε Nap + NΛη max = Εκρ tensiunea la joncțiunea pn va fi defalcată EBO^cr A¿ap + N dp JJ , ν - Γψ - αK i * ~ q , * £Toκρ (,) Ultima inegalitate este valabilă pentru toți semiconductorii utilizați la fabricarea diodelor semiconductoare Calculul tensiunii de avarie în timpul defecțiunii termice Pentru a evalua efectul încălzirii asupra curentului invers al diodei, introducem conceptul de coeficient de temperatură al curentului invers (prin analogie cu alți coeficienți de temperatură - TKr, TK /?, TKε etc): α = TK/ = - τ (,) Să substituim în ( ) aproximarea curentului invers ( ) Apoi ! [exp(^)] A , / DE\ /", exP^-~¿rJ eh tr · (,) În ecuația diferențială ( ), puteți separa variabilele și apoi realizați integrarea, căzând limitele integrării: T /env ' env unde fcr este curentul invers prin diodă la temperatura inițială Hocr La integrare, neglijăm dependența de temperatură a lui a, luând acest parametru din semnul integral În acest caz, rezultatul final poate fi considerat valabil în prima aproximare doar pentru o mică supraîncălzire a joncțiunii p-n în raport cu mediul care înconjoară dioda Apoi, ca rezultat al integrării, obținem a (T - Tacr) - In-y-i -, înv SAU exp [(- Tacr)] = -¡- * înv adică / = /ocPexp [a(T - Tacr)] (,) Dacă acum înlocuim expresia curentului invers prin coeficientul de temperatură al acestui curent ( ) în ecuația de echilibru termic ( ), atunci u = Rm-os/okrexp [a(GR-G Kr)]' ^' ^ Pentru defalcare termică, dU/dT = Prin urmare, după diferențierea formulei ( ) și a abrevierilor, obținem - a(G - Hocr) = De aici temperatura joncțiunii p-n în timpul defecțiunii termice T = Σοκρ + /α (,) Pentru

diodele semiconductoare, valoarea coeficientului de temperatură a curentului invers este de obicei de aproximativ , K- , adică în timpul defecțiunii termice, temperatura joncțiunii p-n depășește temperatura ambiantă cu doar aproximativ K Este tocmai din cauza supraîncălzirii mici a tranziția p-n- la începutul dezvoltării defecțiunii termice, putem considera coeficientul de temperatură al curentului invers ca o valoare constantă cu o modificare a temperaturii și îl putem scoate din semnul integral Desigur, odată cu dezvoltarea defalcării termice cu o creștere suplimentară a curentului invers, temperatura joncțiunii p-n poate crește semnificativ - până la topirea materialului semiconductor Folosind valoarea obtinuta a temperaturii jonctiunii pn in timpul defectarii termice ( ) si substituind-o in ( ), obtinem í/eșantioane = - , - (,) aRrnJoKpe Prin urmare, tensiunea de rupere în timpul defecțiunii termice dioda este determinată de curentul invers, coeficientul de temperatură factor de curent invers și rezistență termică O atenție deosebită trebuie acordată dependenței puternice a tensiunii de defecțiune termică de temperatura ambiantă Odată cu creșterea temperaturii ambiante, tensiunea de avarie în timpul defecțiunii termice în conformitate cu ( ) și ( ) scade (Fig) Tensiunea de rupere scade, în primul rând, datorită creșterii puterii degajate la aceleași tensiuni inverse și, în al doilea rând, datorită deteriorării eliminării căldurii din joncțiunea pn Deoarece tensiunea de defalcare în timpul defecțiunii termice depinde de curentul invers prin diodă la temperatura ambiantă, atunci în diodele cu curenți inversi mari, chiar și la temperatura camerei, se creează condiții pentru defecțiunea termică și are loc mai devreme decât defectarea avalanșelor Acest lucru este valabil, în special, pentru diodele cu germaniu În schimb, în diodele de siliciu, datorită curenților inversi semnificativ mai mici, tensiunea de defalcare termică este atât de mare credem că o spargere de avalanșă are loc mai devreme Cu toate acestea, acest lucru nu înseamnă că nu poate exista o defalcare termică a diodelor de siliciu Poate apărea la temperaturi ambientale ridicate În plus, defecțiunea poate începe ca o avalanșă și apoi, pe măsură ce curentul invers crește, se transformă într-unul termic Datorită faptului că tensiunea de rupere în timpul defecțiunii termice scade odată cu creșterea rezistenței termice, trebuie acordată o atenție deosebită perfecțiunii designului diodei în ceea ce privește reducerea rezistenței sale termice De asemenea, trebuie remarcat faptul că rezistența termică poate crește din cauza montării necorespunzătoare a diodei atunci când este izolată termic În acest caz, tensiunea de defecțiune termică poate fi redusă semnificativ Același lucru se poate întâmpla atunci când condițiile din mediu se schimbă (de exemplu, când presiunea aerului scade din cauza ascensiunii la o înălțime mare) Caracteristici de defalcare termică în diode reale Defalcarea termică a diodelor reale are loc întotdeauna odată cu formarea unui așa-numit "cord" sau a unui canal de conductivitate ridicată, a cărui temperatură depășește temperatura medie a restului joncțiunii p-n La rândul său, formarea unui filament poate fi cauzată fie de defecte într-o joncțiune pn reală, fie de o fluctuație statistică a densității de curent invers asupra zonei joncțiunii pn Într-adevăr, dacă la un moment dat în joncțiunea p-n, la un moment dat, densitatea curentului invers s-a dovedit a fi ceva mai mare decât densitatea curentului invers în restul joncțiunii p-n, atunci temperatura acestui loc al joncțiunii p-n va fi mai mare datorită puterii specifice mai mari eliberate acolo O creștere a temperaturii va duce la o creștere a densității curentului invers la o anumită locație a joncțiunii p-n datorită creșterii generării termice

a purtătorilor fie în joncțiunea în sine (vezi §), fie în regiunile adiacente semiconductorului la joncțiunea p-n (vezi , și) O creștere locală a densității de curent va determina o creștere locală a temperaturii, o creștere a temperaturii va determina o creștere a densității de curent etc Diametrul filamentului rezultat din defalcarea termică poate fi de doar câțiva micrometri Lungimea sa este determinată de grosimea joncțiunii pn, adică poate fi de zeci de micrometri Prin urmare, ținând cont de volumul mic al filamentului, ar trebui să se concluzioneze că, pentru dezvoltarea defalcării termice în diodele reale în timpul împingerii curentului, este necesară o putere foarte mică, adică defalcarea termică poate apărea la curenți inversi mici și tensiuni inverse scăzute Putere specifică, alocați Mai într-o unitate de volum a cablului, chiar și la curenți inversați foarte mici prin diodă, se dovedește a fi destul de mare În conformitate cu ( ), filamentul trebuie supraîncălzit cu aproximativ K pentru apariția defecțiunii termice Acest lucru indică, în primul rând, că este nevoie din nou de o putere scăzută pentru dezvoltarea termică - acest fenomen este reversibil, dacă, desigur , curentul invers este limitat în timpul defecțiunii, fără a aduce încălzirea cablului la apariția unor procese fizice și chimice ireversibile în semiconductor Orez CVC pentru defalcarea termică a unei diode și a unei hiperbole de putere egală Orez CVC al cablului ( ) și rezistența la șunt a restului tranziției p-n ( ), care împreună pot da un CVC în formă de Y al diodei ( ) în timpul defecțiunii termice O consecință a volumului mic al filamentului, de-a lungul căruia are loc defalcarea termică, este și inerția mică a procesului de defalcare termică a diodelor reale Constantele de timp termice pentru încălzirea și răcirea cablului pot fi de ordinul - -IO- s În același timp, trebuie să se țină cont de faptul că, în timpul defecțiunii termice, tensiunea pe diodă scade și capacitatea de barieră a joncțiunii p-n a diodei este descărcată prin rezistența cablului cu eliberarea de putere suplimentară în cordon Acest fenomen accelerează încălzirea cablului și reduce inerția procesului de defalcare termică O altă consecință a ciupirii curentului în timpul defecțiunii termice a diodei este posibilitatea obținerii unui fel de CVC - așa-numitul CVC în formă de y, care la prima vedere contrazice mecanismul de defalcare termică a diodei Într-adevăr, odată cu creșterea curentului prin diodă, temperatura joncțiunii pn trebuie să crească tot timpul, ceea ce se vede atât din ecuația bilanţului termic ( ) cât şi din relaţia ( ) Astfel, curbele (hiperbolele) de putere egală trebuie tăiați caracteristicile I-V ale diodei, ținând cont de generarea de căldură în joncțiunea pn, doar într-un punct (Fig) Cu toate acestea, defalcarea termică are loc de-a lungul unui cablu cu o secțiune transversală foarte mică Dacă ar fi posibil să se izoleze un filament din întreaga joncțiune p-n, atunci CVC-ul acestuia ar corespunde tuturor condițiilor de defalcare termică (curba din Fig) Prin restul joncțiunii pn, aria care este cu câteva ordine de mărime mai mare decât secțiunea transversală a cablului, curge curentul invers, adică poate fi caracterizat printr-o anumită rezistență R Pentru simplitate, vom va presupune că rezistența R este constantă - cu o caracteristică liniară I-V (curba) Dacă rezistența R se dovedește a fi mai mică decât valoarea absolută a rezistenței diferențiale negative a cablului în secțiunea de cădere a CVC-ului său, atunci CVC total al diodei (curba) va avea o formă în formă de Y În consecință, caracteristicile I-V în formă de y nu contrazic mecanismul de defalcare termică a diodei După cum sa menționat, tensiunea de defectare în timpul defecțiunii termice scade odată cu creșterea temperaturii

ambientale Cu toate acestea, defalcarea termică poate fi precedată de avalanșa, care este caracterizată printr-un coeficient de temperatură pozitiv al tensiunii de defalcare Prin urmare, dependența de temperatură a tensiunii de defalcare pentru o diodă în prezența defecțiunilor termice și de avalanșă poate fi complexă și chiar nemonotonă, deoarece la temperaturi ridicate poate apărea o defecțiune termică fără o defecțiune anterioară de avalanșă § Efectul stărilor de suprafață asupra caracteristicii curent-tensiune a unei diode Într-o diodă semiconductoare reală, joncțiunea electrică de redresare merge în mod necesar la suprafața semiconductorului În acest sens, starea suprafeței afectează CVC-ul diodei Această influență este mult mai pronunțată pe ramura inversă a caracteristicii I-V, deoarece curenții inversi sunt foarte mici Orez Influența stărilor de suprafață asupra ramurii inverse a CVC a diodei: O - fără a lua în considerare stările de suprafață; / - luarea în considerare a generării de purtători de sarcină la suprafață; - în prezența unui canal de conductivitate electrică de suprafață; - cu un strat îmbogățit pe suprafața bazei Natura influenței stărilor de suprafață depinde de semnul și valoarea sarcinii de suprafață Să luăm în considerare trei variante posibile ale influenței stărilor de suprafață Generarea de purtători de sarcină pe suprafața unui semiconductor Generarea și recombinarea purtătorilor de sarcină pe suprafața unui semiconductor, de regulă, sunt mai intense decât în volumul său (vezi §) Curenții inversi ai unei diode semiconductoare sunt afectați de generarea purtătorilor de sarcină pe suprafață în același mod ca generarea de purtători în volum Cu toate acestea, curenții inversi ai diodei depind de rata de generare a suprafeței, iar rata de generare a suprafeței se poate modifica în timp datorită modificărilor încărcăturii de suprafață În orice caz, curenții inversi ai diodei, ținând cont de generarea de purtători de sarcină la suprafață, ar trebui să fie mai mari decât curenții fără generarea de purtători pe suprafață (curba în Fig) Canale de conducție de suprafață Dacă există o sarcină de suprafață mare pe suprafața semiconductorului, care coincide în semn cu sarcina purtătorilor principali de la baza diodei, atunci o astfel de sarcină de suprafață respingătoare A PjCpjOOOQ oooooooooh oh XcHogogo(c) (c)(c)(c)(c)f Ï°Ï ° (c)(c)(c)(c) (c)(c)(c) (c) (c)(c)(c)(c)(c)F p Qs +++++++++++++++++ (c) (c) (c) (c)*(c)*(c) (c) (c) (c) (c)*(c)*(c)· e e (c)*(c)*(c)*(c) Q°Q°ț°l (c) (c) (c) (c)*(c)*(c)· (c) f (c)*(c)*(c)*(c) ζυ jθθθ !"·········· f (c)*(c)*(c)*(c)*(c)· f (c)*(c)*(c)*(c)*(c) ϕ ϕ(c)*(c)*(c)*(c)· (c) f(c)*(c)*(c)*(c) f (c)(c)*(c)*(c)*(c)· f ff f f f f f φ φ φ φ (c)(c) *(c)*(c)*(c) (c) f(c)*(c)*(c)*(c)· @ (c)(c)*(c)*(c)*(c) δ) Orez Distorsiunea limitelor tranziției p-m sub influența unei sarcini de suprafață: a - în timpul formării unui strat invers pe suprafața bazei diodei; b - când se formează un strat îmbogățit pe suprafața bazei diodei îndepărtează purtătorii majoritari de pe suprafața bazei și atrage purtătorii minoritari la suprafață, ceea ce duce la formarea unui strat invers pe întreaga suprafață a bazei (Fig , a) Când apare un strat invers, aria joncțiunii pn crește Acum, extragerea purtătorilor minoritari din bază va avea loc nu numai din stratul de bază cu o grosime de ¿p adiacent joncțiunii pn în volum, ci și din același strat adiacent suprafeței de bază (Fig , a) Prin urmare, stratul invers poate participa și la colectarea purtătorilor de sarcină minori de la baza diodei Datorită faptului că un curent trece de-a lungul stratului invers, tensiunea dintre stratul invers și volumul bazei nu rămâne constantă - pe măsură ce se îndepărtează de limita metalurgică a joncțiunii pn, scade (Fig) În acest caz, este necesar să se țină cont

de rezistivitatea mare a stratului invers datorită grosimii sale mici Apoi, la o anumită distanță / de limita metalurgică a tranziției p-n, această tensiune este aproximativ egală cu kT / q În consecință, nu întregul strat invers participă la colecția de purtători non-bazici, ci doar partea sa cu lungimea / Partea stratului invers care participă la extracția purtătorilor de sarcină minoritari se numește canal de conducție de suprafață Odată cu o creștere a tensiunii inverse pe diodă, crește și lungimea canalului de conducție de suprafață (Fig) Astfel, ramura inversă a CVC a diodei în prezența unui canal de conductivitate electrică de suprafață în regiunea de bază nu va avea o secțiune de saturație (vezi Fig , curba) L b) LL q O Orez Modalități de mișcare a purtătorilor de sarcină minoritari în prezența conductibilității electrice de suprafață pe suprafața bazei canalului (a) și distribuția tensiunii de-a lungul canalului (b) Defectarea suprafeței Defalcarea de suprafață a joncțiunii p-/i se numește ruperea tranziției, care are loc în punctul în care tranziția iese pe suprafața cristalului și a cărei tensiune de rupere este influențată de stările de suprafață Dacă sarcina de suprafață (sarcina stărilor de suprafață) are semnul opus purtătorilor majoritari în baza diodei, atunci pe suprafața bazei se formează un strat îmbogățit (vezi §) Datorită apariției unui strat îmbogățit, grosimea joncțiunii pn în apropierea suprafeței de bază scade, deoarece câmpul electric de difuzie al joncțiunii pătrunde în stratul îmbogățit la o adâncime mai mică Orez Dependența tensiunii de rupere a diodei de sarcina de suprafață, care creează un strat îmbogățit lângă suprafața bazei, la diferite concentrații de impurități în bază (vezi Fig) Influența sarcinii de suprafață afectează în principal regiunea bazei, deoarece rezistivitatea acesteia este mare Datorită grosimii mai mici a joncțiunii pn în apropierea suprafeței, defalcarea diodei se va produce exact acolo, iar tensiunea de rupere va fi cu atât mai mică, cu atât mai mare este îngustarea joncțiunii de lângă suprafață (vezi Fig , curba)) Astfel, valoarea tensiunii de ruptură depinde în acest caz de densitatea stărilor de suprafață sau de valoarea sarcinii de suprafață care creează un strat îmbogățit în apropierea suprafeței de bază (Fig) Prin natura sa, deteriorarea suprafeței poate fi avalanșă, tunel sau termică § PROCESE ÎN DIODE PENTRU CURENȚI ÎNALTĂȚI DE ÎNTÂMPRE Înainte de a lua în considerare fenomenele din diodele semiconductoare la curenți înalți înainte, să stabilim conceptele nivelului de injecție Prin nivelul de injecție înțelegem raportul dintre concentrația purtătorilor minoritari și concentrația purtătorilor majoritari în starea de echilibru (sau, ceea ce este aproape aceeași, concentrația de impurități) Vom considera că un nivel scăzut de injecție este unul la care concentrația de purtători minoritari injectați este semnificativ mai mică decât concentrația de purtători majoritari în starea de echilibru, adică pentru un semiconductor de tip n Pp PnO == &Pp sau rp L/ ηη N (,) Apariția unui câmp electric în bază Egalitatea (,) este aproximativă, deoarece pentru a menține o distribuție neuniformă a purtătorilor majoritari în bază, este necesar un câmp electric, care apare din cauza compensării incomplete a sarcinii purtătorilor minoritari în apropierea joncțiunii pn În principiu, neutralizarea încărcăturii purtătorilor injectați nu poate fi absolut completă Într-adevăr, dacă presupunem neutralizarea completă, atunci, în primul rând, nu va exista niciun motiv pentru distribuția neuniformă a transportatorilor principali În al doilea rând, distribuția neuniformă a purtătorilor principali fără câmp electric va duce la apariția unui curent de difuzie al electronilor în direcția opusă direcției adevărate

de mișcare a electronilor în baza diodei atunci când aceasta este pornită direct Astfel presupunerea despre neutralizarea absolută a încărcăturii purtătorilor injectați duce la contradicții Rămâne de presupus că neutralizarea sarcinii se dovedește a fi incompletă - concentrația în exces a purtătorilor majoritari în apropierea joncțiunii p-n rămâne puțin mai mică decât concentrația în exces a purtătorilor minoritari Intensitatea câmpului electric care rezultă din sarcina necompensată menține o distribuție neuniformă a purtătorilor de sarcină principali în bază O altă componentă a câmpului electric din baza diodei este o consecință a trecerii curentului prin rezistența în vrac a bazei Pentru a determina valoarea totală a câmpului electric din bază, folosim expresiile pentru densitatea curenților de electron ( ) și gaură ( ), precum și expresia pentru densitatea totală de curent ( ), ținând cont faptul că în starea de echilibru δ(εεoE) STARE v - di Din condiția de neutralitate electrică ( ) pentru o diodă cu o bază uniform dopată, adică pentru Mg(x) - const, rezultă că grad /i = grad p Apoi J = q(pvp + /vμn) E + q(Dn - Dp)grad p Și E=-y-η -Dn Dp gradp ρ(ρμP + πμη) ρμρ-\-ημη (,) Rezultatul obținut arată că intensitatea câmpului electric constă într-adevăr din două componente Prima dintre ele este egală cu raportul dintre densitatea totală a curentului și conductivitatea specifică a bazei, adică, în conformitate cu legea lui Ohm în formă diferențială, reprezintă intensitatea câmpului electric care rezultă din trecerea curentului prin materialul de bază cu conductivitate finită Trebuie remarcat faptul că conductivitatea specifică în acest caz nu este constantă, depinde de concentrația purtătorilor de sarcină și, prin urmare, de densitatea de curent prin diodă A doua componentă a intensității câmpului electric este determinată de gradientul de concentrație al purtătorilor de sarcină Această componentă este puterea câmpului electric, care menține o distribuție neuniformă a concentrației purtătorilor majoritari pentru a asigura neutralitatea electrică aproape completă a bazei Dacă integrăm ( ) peste coordonate, obținem o diferență de potențial, care va avea și două componente Prima dintre acestea este căderea de tensiune în vrac rezistența de bază A doua componentă este așa-numita CEM Dember, care a fost discutată în § Această fem poate apărea într-un semiconductor cu o distribuție neuniformă a purtătorilor chiar și în absența curentului prin semiconductor, așa cum se poate vedea din relația ( ) Deci, atunci când un semiconductor este iluminat, apare o diferență de potențial între părțile iluminate și neluminate CEM post-injectare are o natură similară (vezi §) Astfel, la curenți mari în baza diodei, pe lângă difuzia purtătorilor de sarcină, este necesar să se țină cont de deriva acestora În plus, datorită prezenței unui câmp electric în bază la curenți mari prin diodă, tensiunea la joncțiunea pn diferă de tensiunea aplicată la bornele diodei Modificarea parametrilor electrofizici Durata de viață a purtătorilor de taxe La un nivel ridicat de injectare, cursul procesului de recombinare se modifică Acest lucru este valabil pentru orice model al procesului de recombinare Astfel, odată cu creșterea concentrației purtătorilor de sarcină minoritari și majoritari, pozițiile nivelurilor de demarcație se modifică și recombinarea poate avea loc prin capcane prin care nu a avut loc la un nivel scăzut de injecție În general, dependența duratei de viață de nivelul de injecție este determinată de mulți factori: tipul și locația nivelurilor de energie ale capcanelor în banda interzisă a semiconductorului, temperatură etc Odată cu creșterea nivelului de injecție, durata de viață poate scădea sau crește și se poate observa și o dependență nemonotonă Mobilitate (coeficient de difuzie) La un

nivel ridicat de injectare, se poate manifesta un alt mecanism de împrăștiere a purtătorilor de sarcină - împrăștierea purtătorilor pe purtători, ceea ce duce la scăderea coeficientului de mobilitate și difuzie al purtătorilor de sarcină Cu toate acestea, acest fenomen poate fi adesea ignorat, deoarece începe să se manifeste la concentrații relativ mari de purtători injectați Modificarea condițiilor la tranzițiile redresoare și ohmice Concentrația la graniță a purtătorilor de sarcină minoritari în apropierea joncțiunii pn la tensiuni directe înalte încetează să mai depindă exponențial de tensiunea pe joncțiune (vezi §) Putem presupune că la tensiuni directe foarte mari, joncțiunea p-n a unei diode semiconductoare pare să dispară, iar dioda devine ca un rezistor cu o rezistență variabilă În același timp, la curenți mari, echilibrul tranziției ohmice este perturbat Aici, din cauza vitezei limitate de mișcare, concentrația purtătorilor minori de sarcină începe să crească, iar concentrația purtătorilor majori crește în consecință (vezi §) În acest caz, baza diodei este umplută cu un număr suplimentar de electroni și găuri, ceea ce duce la o scădere a rezistenței sale, adică la modularea rezistenței bazei diodei § CALCULUL CARACTERISTICILOR VOLT-AMPERI ALE UNEI DIODE LA CURENȚI ÎNALTĂRI Selectarea modelului de diodă Un număr mare de factori care ar trebui luați în considerare la calcularea caracteristicilor I-V ale unei diode la curenți înalți conduc la faptul că, în general, nu este posibilă rezolvarea acestei probleme În acest sens, pentru a efectua un calcul analitic, este indicat să alegeți o astfel de structură a modelului diodei semiconductoare care să permită efectuarea calculului și, în același timp, să corespundă cât mai mult posibil structurii reale a diodei Una dintre astfel de structuri este o diodă semiconductoare cu o joncțiune p+-n asimetrică electron-gaură, cu o bază subțire și cu un contact ideal neredresant la bază În baza de taco Orez Distribuția concentrației purtătorilor de sarcină minoritari în baza unei diode cu o bază subțire: / este un strat cu un nivel ridicat de injectare; - strat cu un nivel mediu de injectare; - strat cu un nivel scăzut de injecție Este posibil să se distingă straturi cu un nivel ridicat de injecție (lângă tranziția electron-gaura), mediu (unde concentrația purtătorilor minoritari este comparabilă cu concentrația purtătorilor majoritari în starea de echilibru) și cu un nivel scăzut de injecție (în apropierea tranziţiei ohmice) (Fig) Evident, pe măsură ce curentul prin diodă crește, acea parte a bazei unde există un nivel ridicat de injecție va crește La curenți suficient de mari, aproape întreaga bază va avea un nivel ridicat de injecție Prin urmare, întregul calcul poate fi efectuat doar pentru un nivel ridicat de injecție Acesta este primul avantaj al modelului ales pentru calcul Al doilea avantaj al unei diode cu bază subțire ca model de calcul este că curentul unui tip de purtători (minoritario) în întreaga bază a unei astfel de diode rămâne constant Acest lucru rezultă din faptul că practic nu există nicio recombinare a purtătorilor în întreaga bază subțire Are loc doar la tranziția ohmică Al treilea avantaj al modelului considerat rezultă din nesimetria tranziției acestuia Dacă concentrația de injectat Deoarece numărul de purtători minoritari la granița joncțiunii p-n nu este încă egal cu concentrația totală a purtătorilor majoritari, care poate fi doar la curenți directe foarte mari, atunci doar un tip de purtător este injectat prin joncțiunea asimetrică - din partea puternică regiune dopată către regiunea ușor dopată În acest caz, întregul curent este asociat cu mișcarea purtătorilor de un tip - găuri Aceasta înseamnă că putem lua în considerare mișcarea unui singur tip de purtători în întreaga bază a

diodei Al patrulea avantaj al modelului considerat este că acesta corespunde structurii reale a majorității diodelor semiconductoare Calculul caracteristicii curent-tensiune a unei diode cu o bază subțire la curenți înalți înainte Pe baza ipotezelor de mai sus, se poate lua în considerare; că în baza diodei considerate curentul de electroni este egal cu zero Apoi intensitatea câmpului electric în baza diodei poate fi găsită din ecuația pentru densitatea curentului electronic [vezi ( )]: Jn = = dpcnE + qDn Luând în considerare relația Einstein ( ) £ kT dnn q pp dx (,) Acest mod de determinare a intensității câmpului electric în baza diodei este oarecum diferit de metoda folosită în § și în acest caz este mai convenabilă Folosind condiția de neutralitate electrică a bazei ( ), obținem £ kT dpn q Pη + ΝΆη dx Relația ( ) este valoarea completă a intensității câmpului electric, inclusiv câmpul asociat cu căderea de tensiune pe rezistența de volum a bazei și câmpul datorat EMF Dember Apoi, substituind ( ) in ( ), obtinem componenta de gaura a densitatii de curent in baza diodei si, in consecinta, curentul prin dioda: Rp Rp + ΝΆη dpn dx dpn dx' / p - qDp SAU Expresia ( ) seamănă cu formula de calcul al componentei de difuzie a densității de curent ( ), deoarece densitatea de curent s-a dovedit a fi proporțională cu gradientul de concentrație a purtătorului Cu toate acestea, această similitudine este formală, deoarece, de fapt, calculul a luat în considerare și intensitatea câmpului electric din baza diodei Expresia pentru densitatea curentului de gaură prin diodă ia o formă deosebit de simplă la un nivel ridicat de injecție, adică atunci când JP=-q Dp-^ (,) Astfel, curentul orificiului prin diodă este direct proporțional cu gradientul de concentrație al purtătorilor de sarcină din bază, iar factorul de proporționalitate nu depinde de concentrația purtătorilor În expresia ( ), coeficientul de difuzie este dublat, ceea ce reflectă influența câmpului electric în baza diodei Asemănarea formală a expresiei pentru densitatea de curent la un nivel ridicat de injecție ( ) cu expresia pentru un curent pur de difuzie ( ) face posibilă simplificarea calculului CVC al unei diode la un nivel ridicat de injecție, întrucât toată diferența față de calculul considerat mai devreme la un nivel scăzut de injecție constă doar în dublarea coeficientului de difuzie, adică J = Jp=^^ (exp ^-l) (,) În ecuația pentru caracteristicile IV ale diodei la un nivel scăzut de injecție [vezi ( )] tensiunea U avea semnificația tensiunii la joncțiunea pn De asemenea, a fost considerată egală cu tensiunea diodei, deoarece căderea de tensiune pe baza diodei la un nivel scăzut de injecție ar putea fi neglijată La un nivel ridicat de injecție, ar trebui să se țină cont de diferența de căderi de tensiune pe joncțiune și pe diodă, marcând tensiunea din formula ( ) cu indicele pn Acum, sensul fizic al formulei obținute este clar, dar este, de asemenea, necesar să găsim distribuția căderilor de tensiune pe diodă Calculul căderii de tensiune de bază într-o diodă de bază subțire Căderea totală de tensiune pe diodă este suma căderilor de tensiune pe joncțiunea p-n și la baza diodei Căderea de tensiune pe baza diodei poate fi găsită folosind relația pentru intensitatea câmpului electric în bază ( ) și transformând integrala asupra coordonatei în integrala asupra concentrației purtătorilor de sarcină: Ub oo u = Ç d Ih = - Ç Edx=- Ç - ^ dx= W " -co La tensiuni scăzute ale diodei, curentul poate fi determinat prin recombinare în joncțiunea pn Apoi depinde de tensiune ca exp-^"r [vezi ( )], care dă un segment de dreaptă cu o pantă de / pe grafic La tensiuni înalte, curentul asociat cu injectarea purtătorilor de sarcină și în funcție de tensiune ca exp-^- [vezi ( )], care dă un segment de linie dreaptă pe grafic cu un factor de pantă de Odată cu o

creștere suplimentară a curentului, împreună cu injectarea purtătorilor de sarcină, modularea rezistenței începe să afecteze de bază, care dă din nou dependența exp ^ ^ - [vezi ( )] sau pe J eu Orez Ramura directă a caracteristicii I-V a diodei: - secțiunea curenților mici; - regiune cu predominanţă a recombinării purtătorilor în joncţiunea pn; - zona cu predominanta procesului de injectare; - secțiune asociată cu modularea rezistenței de bază la un nivel ridicat de injecție; - secțiune asociată cu încălcarea condițiilor la limitele bazei cu o tranziție p-n și cu o tranziție ohmică grafic - un segment de dreaptă cu o pantă de / În cele din urmă, la curenți directe foarte mari, caracteristica I-V a diodei devine neexponențială din cauza încălcării condițiilor la joncțiunea p-n și la joncțiunea ohmică Segmentul corespunzător din grafic nu va fi o linie dreaptă Astfel, reprezentarea grafică a caracteristicilor I-V ale unei diode pe o scară semilogaritmică poate oferi informații despre posibilele mecanisme de curgere a curentului Trebuie avut în vedere că tronsoanele drepte pot trece fără probleme în goy, deci nu se poate determina exact Uneori lipsesc unele tronsoane De exemplu, pentru unele diode de siliciu, secțiunea corespunzătoare curentului de recombinare se poate schimba imediat în secțiunea corespunzătoare unui nivel ridicat de injecție Granițele lor nu pot fi găsite Aspectul caracteristicilor este, de asemenea, distorsionat de modificări ale duratei de viață a purtătorilor, temperaturii, prezența canalelor de conducție de suprafață etc această curbă este una în cealaltă - limitele lor posibile § TRANZIȚII ÎN DIODE Tranzitorii în diodele semiconductoare sunt în principal asociați cu două fenomene care apar atunci când tensiunea pe diodă sau curentul prin diodă se modifică rapid Prima dintre acestea este acumularea purtătorilor de sarcină minoritari în baza diodei când aceasta este pornită direct și absorbția lor când tensiunea scade Deoarece câmpul electric din baza diodei este de obicei mic, mișcarea purtătorilor minoritari în bază este determinată de legile difuziei și are loc relativ lent Prin urmare, acumularea de purtători în bază și disiparea lor pot afecta proprietățile diodelor în "modul de comutare" Al doilea fenomen care apare la diode atunci când sunt comutate este reîncărcarea capacității barierei, care, de asemenea, nu are loc instantaneu și, prin urmare, poate afecta proprietățile diodelor La densități relativ mari de curent direct prin diodă, acumularea de purtători minoritari în baza diodei este semnificativă, iar reîncărcarea capacității de barieră a diodei este un proces secundar La densități de curent scăzute, procesele tranzitorii din diodă sunt determinate de reîncărcarea capacității de barieră a diodei, în timp ce acumularea purtătorilor de sarcină minoritari în bază nu are practic niciun efect Dependența de timp a tensiunii și curentului, care caracterizează procesele tranzitorii într-o diodă semiconductoare, depind și de rezistența circuitului extern în care este conectată dioda Prin urmare, luăm în considerare patru cazuri limită de tranzitorii într-o diodă semiconductoare cu o tranziție p + -n asimetrică Procese la tensiuni și curenți înalți Funcționarea unei diode într-un circuit cu un generator de tensiune Să luăm în considerare procesele care au loc într-o diodă semiconductoare atunci când este conectată la un generator de tensiune, adică atunci când o diodă este conectată la un circuit cu impedanță scăzută (inclusiv rezistența scăzută a sursei de alimentare) în comparație cu rezistența diodei Când se aplică o tensiune continuă diodei, curentul prin diodă nu este stabilit imediat, deoarece în timp, purtătorii minoritari (găurile) injectate prin joncțiunea p-n se acumulează în bază și, ca urmare, rezistența de bază scade (Fig) Acest proces de

modulare a rezistenței bazei nu are loc instantaneu, deoarece acumularea de găuri în baza diodei este asociată cu un proces relativ lent de difuzie a acestora de la joncțiunea p-n adânc în bază Pe măsură ce găurile se acumulează și rezistența de bază scade, întreaga tensiune externă este redistribuită între rezistența de bază și joncțiunea p-n; scăderea de tensiune la baza diodei scade (Fig , b), și crește la joncțiunea p-n (Fig , c), determinând o creștere a nivelului de injecție (Fig , e) Cu o trecere lungă a curentului continuu, procesul de injectare a găurilor este echilibrat de procesul de recombinare a acestora Apare o anumită stare de echilibru, caracterizată printr-o astfel de distribuție a găurilor în bază, în care concentrația lor depășește echilibrul din apropierea joncțiunii p-n și scade, tinzând spre echilibru, pe măsură ce te îndepărtezi de ea adânc în bază (curba din Fig , e) Valoarea curentului prin joncțiunea p-n poate fi judecată după gradientul de concentrație al găurilor de la baza diodei lângă joncțiunea p-n (vezi §) Gradientul de concentrație al găurilor din apropierea joncțiunii p-n crește A) DESPRE , - eu eu Orez Dependența de timp a tensiunii pe diodă (a), a tensiunii de la baza diodei (b), a tensiunii la joncțiunea p-n (c) și a curentului prin diodă (d) atunci când dioda funcționează la o tensiune mare impulsuri de la generatorul de tensiune, precum și purtătorii minoritari de distribuție a concentrației din baza diodei în momente diferite când dioda este pornită în direcția înainte (e) și când este comutată la tensiune inversă (e) cu o creștere a tensiunii la joncțiunea pn la o tensiune constantă pe diodă și cu o scădere a tensiunii la baza diodei (Fig , e) Trebuie remarcat faptul că rezistența bazei diodei scade nu numai datorită creșterii concentrației purtătorilor minoritari (găuri), ci și datorită creșterii concentrației purtătorilor majoritari (electroni) Concentrația de electroni în apropierea tranziției p-p crește în conformitate cu principiul neuro-electric e) Rpo DESPRE Orez Dependența de timp a curentului prin diodă (a), tensiunea la bază (b), tensiunea la joncțiunea p-n (c) și tensiunea pe diodă (d) atunci când dioda funcționează la impulsuri mari de curent într-un circuit cu un generator de curent, precum și concentrația de distribuție a purtătorilor de sarcină minoritari în baza diodei în momente diferite când dioda este pornită (e) și când dioda este oprită (e) conform căreia, în orice parte a regiunii de bază, suma tuturor sarcinilor trebuie să fie egală cu zero Evident, cu cât numărul de găuri acumulate în bază este mai mare, cu atât este mai mare curentul prin diodă și cu atât durata de viață a găurilor este mai mare În plus, numărul de puncte acumulate depinde de geometria bazei La comutarea diodei de la tensiunea directă la tensiunea inversă, în momentul inițial se observă un curent invers mare, limitat în principal de rezistența în serie a bazei diodei Sursa de alimentare, împreună cu rezistența de bază în acest moment, poate fi considerată un generator de curent pentru joncțiunea p-n După comutarea diodei la tensiune inversă, începe procesul de resorbție a purtătorilor minoritari acumulați în bază Datorită limitării curentului invers, concentrația găurilor din bază în apropierea joncțiunii pn nu poate scădea instantaneu la valoarea de echilibru Atâta timp cât concentrația găurilor din bază în apropierea joncțiunii p-n depășește valoarea de echilibru, la joncțiunea p-n rămâne o cădere de tensiune continuă (Fig , c) După ce concentrația de găuri în bază în apropierea joncțiunii p-n scade la zero, curentul invers începe să scadă cu timpul, așa cum este demonstrat de scăderea gradientului de concentrație a găurilor în apropierea joncțiunii p-n (Fig , e) În timp, toate găurile acumulate în bază pleacă prin

joncțiunea p-n sau se recombină în baza diodei, drept urmare curentul invers scade la o valoare staționară a curentului de saturație (Fig , d) În acest moment, restabilirea rezistenței inverse a diodei se termină Procesul de resorbție a purtătorilor acumulați are loc semnificativ mult mai lent decât procesul de acumulare a acestora, prin urmare, procesul de absorbție este cel care determină proprietățile de frecvență ale majorității diodelor Funcționarea unei diode într-un circuit cu un generator de curent corespunde includerii unei diode într-un circuit cu o rezistență mare, care determină valoarea curentului în circuitul cu o diodă Luați în considerare procesele mersul în diodă, când un impuls de curent continuu de formă dreptunghiulară trece prin diodă (Fig) În primul moment de trecere a unui impuls de curent continuu prin diodă, o tensiune relativ mare scade pe diodă, care ulterior scade din cauza scăderii rezistenței regiunii de bază a diodei, asociată cu acumularea de purtători de neechilibru în baza După încheierea procesului de acumulare a purtătorilor minoritari în bază, tensiunile pe diodă, pe baza diodei și pe joncțiunea p-n ajung la valori de regim staționar Distribuția găurilor în bază în acest moment corespunde și unei anumite stări de echilibru (curba din Fig , e) La sfârşitul impulsului curent prin diodă, adică în momentul întreruperii circuitului cu dioda, căderea de tensiune pe rezistența în vrac a bazei diodei dispare (Fig , b) Concentrația găurilor din bază lângă joncțiunea p-n nu se poate schimba instantaneu Prin urmare, tensiunea la joncțiunea p-n și, în consecință, la diodă, după oprirea curentului, scade lent pe măsură ce purtătorii de neechilibru se recombină în bază Modificările în timp în distribuția concentrației de găuri în baza diodei sunt prezentate în Fig , e Tensiunea reziduală de pe diodă va scădea la zero după recombinarea tuturor purtătorilor de sarcină neechilibrați din regiunea de bază a diodei Procese la tensiuni și curenți scăzute Funcționarea unei diode într-un circuit cu un generator de tensiune Atunci când diodei este aplicată o tensiune continuă mică (Fig), efectul de modulare a rezistenței bazei diodei este neglijabil datorită nivelului scăzut de injecție Prin urmare, rezistența diodei în acest caz are o capacitate a) Oh δ) Despre eu eu II eu II i eu eu eu eu eu eu eu eu eu eu II II eu Uper Orez Dependența de timp a tensiunii pe diodă (a), a tensiunii pe joncțiunea p-n (b) și a curentului prin diodă (c) la impulsuri mici de tensiune într-un circuit cu un generator de tensiune, precum și circuitul echivalent al diodei pentru semnale mici (d) caracter În primul moment, tensiunea la joncțiunea pn este aproape de zero, iar curentul prin diodă este limitat doar de rezistența bazei diodei (Fig) Pe măsură ce capacitatea barieră este încărcată, tensiunea la joncțiunea pn și curentul prin diodă tind la niște valori constante, care sunt determinate de componenta activă a rezistenței joncțiunii pn În momentul comutării diodei, tensiunea peste capacitatea barierei nu se poate schimba instantaneu, atinge o valoare constantă după un timp Curentul prin diodă depinde și de timp, ceea ce este tipic pentru capacitate A) b) O O Orez Dependența curentului prin diodă (a) și a tensiunii pe diodă (b) atunci când dioda funcționează pe impulsuri de curent mici într-un circuit cu un generator de curent Funcționarea unei diode într-un circuit cu un generator de curent În Fig În primul moment al trecerii unui impuls de curent prin diodă, întregul curent este format dintr-o componentă capacitivă Prin urmare, tensiunea pe diodă în primul moment este determinată de căderea de tensiune pe rezistența bazei diodei Pe măsură ce capacitatea barieră se încarcă, crește și tensiunea diodei Când opriți dioda de pe ea o tensiune reziduală este

reținută o perioadă de timp, scăzând cu timpul Tensiunea reziduală în acest caz se datorează faptului că capacitatea barieră este încă încărcată Pe măsură ce această capacitate este descărcată prin rezistența activă a joncțiunii pn a diodei, tensiunea la nivelul capacității scade și rămâne tensiune exactă pe diodă § DIODE DE JASĂ FRECVENȚĂ PLAN DE RECTIFICARE Diodele redresoare planare de joasă frecvență sunt de obicei utilizate pentru a redresa curentul alternativ de frecvență industrială (Hz) În echipamentul de bord, frecvența tensiunii alternative este de Hz Mult mai rar, diodele redresoare de joasă frecvență trebuie să funcționeze la frecvențe și mai mari Deci, în convertoarele de tensiune cu tranzistori, frecvența curentului alternativ redresat de diodă atinge câteva zeci de kiloherți Dintre parametrii principali și de referință ai diodelor redresoare, trebuie remarcat:) curentul continuu maxim admisibil /prmax;) tensiune directă pe diodă la o valoare dată a curentului direct ¿ pr; de obicei, tensiunea directă pe diodă este indicată la curentul direct maxim admisibil prin diodă;) tensiunea inversă maximă admisibilă t/tensiunea inversă este de obicei mult mai mică decât tensiunea de defalcare;) curent invers la o tensiune inversă dată /rev; de obicei, curentul invers este specificat la tensiunea inversă maximă admisă;) intervalul de temperatură ambientală de funcționare În funcție de valoarea curentului direct maxim admisibil, diodele redresoare sunt împărțite în diode de putere mică (curent direct până la , A), putere medie (curent direct de la , la A) și putere mare (curent direct peste A) La producerea primelor diode redresoare plane (anii ai secolului nostru), germaniul a fost folosit ca material semiconductor inițial, tehnologia de obținere și purificare a monocristalelor a fost deja stăpânită până la acel moment Mult mai târziu, a fost lansată producția de diode planare redresoare de siliciu Datorită avantajelor semnificative ale diodelor redresoare cu joncțiune din siliciu, acestea au înlocuit aproape complet diodele redresoare cu joncțiune cu germaniu din producția de masă În ultimii ani, a fost lansată producția de diode cu arseniură de galiu redresoare în plan diode de siliciu Tehnologia de fabricație și design Cele mai multe dintre diferitele tipuri de diode redresoare de joncțiune din siliciu sunt bazate pe difuzie din punct de vedere tehnologic Tranzițiile electron-gaură ale unor astfel de diode sunt formate prin difuzia aluminiului ion sau bor în cristale de siliciu în cu conductivitate electrică /r-tip şi dif- IIIII fuziunea fosforului în cristale de siliciu | ¡ ¡ | n " cu conductivitate electrică de tip p În tine-/ "Eu diode redresoare ale vechiului dezvoltat / /| Á \ n curent pentru formarea joncțiunilor p-/r / \ utilizați fuziunea aluminiului în / \ cristale de siliciu cu L conductiv electric cristale de siliciu de tip p și topirea unui aliaj de staniu cu fosfor sau aur cu antimoniu în cristale de siliciu de tip p Suprafața necesară a tranziției \u b\u bp-/g- este calculată pe baza valorii curentului direct admisibil al diodei și Orez Structura unei diode de avalanșă, a cărei joncțiune p-n este formată prin difuzia borului în partea centrală a cristalului și difuzia aluminiului în partea inelară ținând cont de densitatea admisă a firului curent, care pentru joncțiunile p-/r din siliciu este egal cu A/CM Grosimea cristalelor inițiale de siliciu este de , , mm Defalcarea joncțiunilor p-/r reale are loc adesea în apropierea suprafeței semiconductorului, adică în locurile în care joncțiunea iese pe suprafața cristalului (vezi Sec) Pentru a exclude posibilitatea defalcării suprafeței, este de dorit ca grosimea tranziției de difuzie (δι) în punctul în care iese pe suprafața cristalului de siliciu, adică în partea inelară de-a

lungul periferiei cristalului, mai mare decât grosimea tranziției (δ) în partea centrală a cristalului (Fig) Acest lucru poate fi realizat în două moduri În primul rând, partea inelară a joncțiunii poate fi formată prin difuzie de aluminiu, iar partea centrală, prin difuzie de bor Coeficientul de difuzie al aluminiului este mai mare decât cel al borului, iar solubilitatea aluminiului în siliciu este mai mică decât cea a borului Prin urmare, gradientul de concentrație al impurității acceptoare în partea inelară este mai mic decât în partea centrală a joncțiunii Grosimea tranziției de difuzie depinde de gradientul de concentrație a impurităților și va fi mai mare în partea inelară a tranziției (vezi Fig) Tensiunea de defalcare a părții inelare a joncțiunii se dovedește a fi mai mare decât tensiunea de defalcare a părții sale centrale Tensiunea de defalcare a întregii diode este independentă de starea suprafeței cristalului; din cauza mai puține defecte în partea centrală a joncțiunii, densitatea curentului invers în timpul defectării avalanșei va fi distribuite uniform pe întreaga zonă Astfel de diode, numite diode de avalanșă, pot rezista la supratensiuni semnificative de curent invers În al doilea rând, probabilitatea deteriorării suprafeței poate fi redusă prin teșirea de-a lungul perimetrului unui cristal de siliciu după crearea unei joncțiuni p-/z în acesta Pentru a reduce intensitatea câmpului electric în punctul în care tranziția iese pe suprafața cristalului și, în consecință, pentru a crește tensiunea de defalcare a defalcării suprafeței, este necesar să teșim din zona puternic dopată la cea ușor dopată (teșire dreaptă sau pozitivă)) prin măcinarea marginilor cristalului Cu o astfel de configurație teșit, grosimea joncțiunii p-/r de lângă suprafața cristalului va crește, ceea ce este cauzat de păstrarea neutralității electrice a joncțiunii p-/r (Fig) Proprietățile de frecvență ale diodelor plane de redresare cu o joncțiune de redresare sub forma unei joncțiuni p-/r, care funcționează de obicei la un nivel ridicat de injecție, sunt determinate de procesele de acumulare și resorbție a purtătorilor de sarcină minori în bază (vezi §) Prin urmare, pentru a îmbunătăți proprietățile de frecvență ale diodelor plane de siliciu din cristalele originale de siliciu, a) a) Orez Structura joncțiunii p-n în punctul de ieșire pe suprafața cristalului fără teșit (a) și cu o teșitură pozitivă (b), care asigură o creștere a grosimii joncțiunii p-n lângă suprafața cristalului duce la difuzia aurului, al cărui amestec creează nivelurile de energie ale capcanelor de recombinare și reduce durata de viață a purtătorilor de sarcină minoritari Astfel de diode plane de siliciu sunt uneori denumite diode de frecvență, subliniind astfel faptul că sunt capabile să funcționeze la frecvențe ridicate (până la kHz) Pentru a proteja împotriva influențelor externe și pentru a asigura o bună disipare a căldurii, într-un pachet este montat un cristal cu o joncțiune p-/r Diodele de putere mică sunt de obicei realizate într-o carcasă de plastic cu cabluri externe flexibile, diode de putere medie - într-o carcasă din sticlă-metal cu cabluri externe rigide, diode de mare putere - din sticlă-metal sau metal carcasă ceramică, adică cu sticlă sau ceramică izolator bucșă Un exemplu de proiectare a unei diode redresoare este prezentat în fig Un cristal de siliciu cu o joncțiune p-/r este lipit la o bază de cupru (la piciorul corpului) în așa fel încât să se obțină o tranziție ohmică între metal și semiconductor Pentru a face acest lucru, utilizați un lipit cu o impuritate donor, dacă cristalul este lipit la baza/regiunea r, și cu o impuritate acceptor, dacă este regiunea p Prezența unui element chimic în lipire, care creează niveluri de capcane de recombinare (aur) în

banda interzisă a siliciului, reduce durata de viață a purtătorilor de sarcină minoritare în apropierea tranziției ohmice și accelerează procesul de resorbție a purtătorilor minoritari acumulați În diodele redresoare de mare putere cu o suprafață mare a cristalului, între baza de cupru și cristalul de siliciu este plasat un distanțier de tungsten sau kovar compensator termic, având aproximativ același coeficient de dilatare liniară ca siliciul În acest fel, solicitările mecanice din cristalul de siliciu care apar la schimbarea subiectelor sunt eliminate sau reduse semnificativ Orez Proiectarea uneia dintre diodele plane de siliciu: / - ieșire exterioară; - tub; - ieșire internă; - izolator bucșă; - corp; - strat protector; - electrod superior pe un cristal semiconductor; - cristal de siliciu cu o joncțiune pn; - regiunea de bază a structurii diodei; - strat de lipit; - suport de cristal; - piciorul corpului; - saiba izolatoare mica; - manșon izolator; - petală purtătoare de curent; - piulițe de fixare peraturie proprietăți electrice Cele mai bune informații despre proprietățile electrice ale diodelor redresoare pot fi obținute din CVC Caracteristicile volt-amperi ale unuia dintre redresoare diode planare de siliciu la diferite temperaturi ambientale sunt prezentate în fig Curenții continui maximi admisibili ai diodelor plane de siliciu de diferite tipuri sunt , A Căderea de tensiune pe diode la acești curenți nu depășește de obicei , V Odată cu creșterea temperaturii, tensiunea directă scade, ceea ce este asociat cu o scăderea înălțimii barierei de potențial p-/r-tranziție și cu o redistribuire a purtătorilor de sarcină peste energii (vezi Sec) Ramura inversă a caracteristicilor I-V ale diodelor de siliciu nu are o secțiune inversă de saturație a curentului, deoarece curentul invers din diodele de siliciu este cauzat de procesul de generare a purtătorilor de sarcină în joncțiunea p-/r (vezi §) Defalcarea diodelor de siliciu are o avalanșă caracter Prin urmare, tensiunea de avarie crește odată cu creșterea temperaturii (vezi §) Pentru unele tipuri de diode de siliciu la temperatura camerei, tensiunea de defectare poate fi de V Tensiunea inversă maximă admisă este tensiunea la care este garantată funcționarea fiabilă a diodei Prin urmare, tensiunea inversă maximă admisă, a cărei valoare este indicată în cărțile de referință, este mult mai mică decât tensiunea de defecțiune De obicei, alegeți ¿Dbrmax = (, ,)£ Prob Pentru a converti AC în DC în circuite cu tensiuni care depășesc tensiunea inversă maximă admisă a unei diode individuale, polii redresoare sunt produși de industrie Un stâlp semiconductor redresor este o colecție de diode semiconductoare redresoare conectate în serie și asamblate într-o singură structură cu două terminale Tensiunea inversă maximă admisă a stâlpilor redresorului cu siliciu este de câțiva kilovolți Pentru comoditatea utilizării diodelor redresoare în redresoare asamblate după diferite circuite de punte (monofazate, trifazate), precum și în redresoare cu dublare a tensiunii, industria produce blocuri semiconductoare redresoare Un bloc semiconductor redresor este un bloc semiconductor asamblat din diode semiconductoare redresoare conectate conform unui circuit electric specific și proiectat într-o singură structură cu mai mult de două fire Intervalul de temperatură de funcționare pentru diodele redresoare din siliciu este limitat la - + °C Limita inferioară a temperaturilor de funcționare se datorează diferenței dintre coeficienții de temperatură de dilatare liniară a diferitelor elemente ale designului diodei: la temperaturi scăzute, apar solicitări mecanice care pot duce la fisurarea cristalului semiconductor Dacă este necesar, această limită a temperaturilor de funcționare poate fi redusă semnificativ, adică deplasată la

temperaturi mai scăzute Limitarea fundamentală în acest caz poate fi legată de energia de ionizare a impurităților din diferite regiuni ale structurii diodei Dar energia de ionizare a impurităților din siliciu, care asigură conductivitate electrică de tip p și /r, este mică Prin urmare, deja la o temperatură de câteva zeci de Kelvin, toți acceptorii și donatorii sunt ionizați Odată cu scăderea temperaturii, este necesar să se țină seama și de creșterea tensiunii directe pe diodă, care are loc datorită creșterii înălțimii barierei de potențial la joncțiunea pn Limita superioară a intervalului de temperatură de funcționare a diodelor redresoare este determinată de o deteriorare bruscă a redresării datorită creșterii curentului invers - afectează generarea termică a purtătorilor de sarcină ca urmare a ionizării atomilor semiconductori Astfel, limita superioară a intervalului de temperatură de funcționare a diodelor redresoare de siliciu, ca majoritatea celorlalte dispozitive semiconductoare, este legată de banda interzisă a materialului semiconductor original diode cu germaniu Tehnologia de fabricație și design Prima tehnologie pentru formarea joncțiunilor p-/r plane în producția de masă a dispozitivelor semiconductoare a fost tehnologia fuziunii impurităților Prin urmare, toate diodele de joncțiune cu germaniu sunt diode din aliaj de modă veche Pentru a crea o joncțiune p-/r aliată într-un monocristal de germaniu, se folosesc cristale de germaniu cu conductivitate electrică /r-tip cu o grosime de , , mm Indiul este folosit ca impuritate acceptoare, care este topită într-un cristal de germaniu la o temperatură de °C Zona de tranziție este determinată de valoarea necesară a dreptei maxime admisibile al-lea curent de diodă și densitatea maximă admisă de curent direct, care pentru joncțiunile cu germaniu pn este de A/cm proprietăți electrice Caracteristicile I-V ale uneia dintre diodele planare cu germaniu la diferite temperaturi ambientale sunt prezentate în fig Principalele diferențe între caracteristicile și parametrii I-V ai diodelor plane redresoare cu germaniu și siliciu sunt următoarele Tensiunea directă pe o diodă cu germaniu la curentul direct maxim admis este de aproximativ două ori mai mică decât pe o diodă cu siliciu Acest lucru se datorează înălțimii mai scăzute a barierei potențiale a joncțiunii p-n cu germaniu, care este un avantaj semnificativ, dar, din păcate, singurul avantaj în fața diodelor redresoare de siliciu Existența unui curent de saturație la repornirea diodei cu germaniu, care este cauzată de mecanismul de formare a unui curent invers - procesul de extracție a purtătorilor de sarcină minori din regiunile adiacente joncțiunii p-n Densitate semnificativ mare Orez CVC al uneia dintre diodele redresoare cu germaniu la diferite temperaturi ambientale curentul invers în diodele cu germaniu, deoarece, în egală măsură, concentrația purtătorilor de sarcină minoritari în germaniu este cu câteva ordine de mărime mai mare decât în siliciu Curenți mari inversați prin diode cu germaniu, în urma cărora defalcarea diodelor cu germaniu are un caracter termic Prin urmare, tensiunea de defalcare a diodelor cu germaniu scade odată cu creșterea temperaturii, iar valorile acestei tensiuni sunt mai mici decât tensiunile de defalcare ale diodelor de siliciu Limita superioară a intervalului de temperatură de funcționare a diodelor cu germaniu este de aproximativ °C, care este semnificativ mai mic în comparație cu același parametru al diodelor de siliciu O caracteristică esențială a diodelor cu germaniu și dezavantajul lor este că nu rezistă nici măcar la suprasarcinile de impuls foarte scurte în direcția inversă pentru joncțiunea p-n Acest lucru este determinat de mecanismul de defalcare al diodelor cu germaniu - defalcare termică care are loc atunci când curentul este asociat cu eliberarea unei

densități mari de putere la locul de defecțiune Diode de arseniură de galiu Toate caracteristicile de mai sus ale diodelor redresoare cu germaniu și siliciu sunt în cele din urmă asociate cu o diferență în lățimea din spate banda interzisă a materialelor semiconductoare originale Din comparația de mai sus, se poate observa că diodele redresoare realizate dintr-un material semiconductor cu bandgap mare au avantaje semnificative în proprietăți și parametri Un astfel de material este arseniura de galiu, a cărui bandă interzisă la temperatura camerei este Δ = , eV Parametrii primelor tipuri de diode redresoare cu arseniură de galiu produse de industrie sunt încă departe de a fi optimi posibili Deci, diodele cu arseniură de galiu de tip AD A sunt proiectate pentru un curent direct admisibil maxim de mA la o tensiune directă de cel mult V Tensiunea directă este mare, ceea ce este un dezavantaj al tuturor diodelor redresoare în general, p- dintre care joncțiuni /r sunt formate într-un material cu zone mari de bandă interzisă Tensiunea inversă maximă admisă a diodelor acestei mărci este de numai V Valoarea scăzută a tensiunii de defecțiune și, în consecință, tensiunea inversă maximă admisă este probabil cauzată de o concentrație mare de defecte în regiunea p-/r- joncţiune Caracteristicile pozitive ale diodelor redresoare cu arseniură de galiu sunt un domeniu de temperatură de funcționare mult mai mare și proprietăți de frecvență mai bune Limita superioară a intervalului de temperatură de funcționare a diodelor de arseniură de galiu AD A este de °C Diodele cu arseniură de galiu AD A pot funcționa ca redresoare de putere mică până la o frecvență de MHz, ceea ce este asigurat de durata scurtă de viață a purtătorilor de încărcare din acest material Astfel, diodele redresoare cu arseniură de galiu, în ceea ce privește proprietățile lor de frecvență, depășesc domeniul de frecvență joasă § RECTIFICATORE DE SELENIU Tehnologia de fabricație și design Plăcile de redresare cu seleniu (Fig) sunt realizate pe baze de aluminiu, care sunt unul dintre electrozii de colectare a curentului Pentru a reduce rezistența de tranziție dintre baza de aluminiu și stratul de seleniu aplicat ulterior, bazele de aluminiu sunt supuse gravării electrochimice Apoi se aplică seleniu amorf pe bază Următoarea operațiune tehnologică este tratamentul termic la o temperatură de °C, aproape de punctul de topire al seleniului În acest caz, seleniul se cristalizează cu o scădere a rezistivității sale cu câteva ordine de mărime Grosimea stratului de seleniu este de microni Pentru a crea un al doilea electrod de colectare a curentului, pe suprafața stratului de seleniu este aplicat un aliaj fuzibil de bismut, cadmiu și staniu La aplicarea acestui aliaj, cadmiul reacţionează cu seleniul şi se formează un strat subţire de seleniură de cadmiu Astfel, joncțiunea electrică de redresare din redresoarele cu seleniu este o heterojoncțiune între seleniu și seleniura de cadmiu Pentru a îmbunătăți proprietățile de redresare, plăcile de redresare cu seleniu sunt supuse formării electrice, care se realizează prin aplicarea unei tensiuni constante în direcția inversă pentru o lungă perioadă de timp Acest lucru creează condiții favorabile pentru difuzia cadmiului în seleniu și creșterea unui strat de seleniură de cadmiu Trecerea unui curent electric contribuie la formarea unei joncțiuni electrice de redresare care este uniformă în grosime, deoarece în cele mai slabe locuri ale joncțiunii va exista o densitate mare a curentului invers, ceea ce va duce la o creștere locală a temperaturii și o combinație mai intensă de cadmiu cu seleniu În instalațiile de redresor de curent alternativ, o serie de plăci redresoare cu seleniu sunt conectate în serie pentru a produce o tensiune redresată mai mare și în paralel

pentru a redresa curenți mai mari Industria produce stâlpi redresoare cu seleniu cu conexiune în serie de până la plăci cu seleniu într-un singur design (redresor GE OU-S) La un astfel de stâlp redresor poate fi aplicată o tensiune alternativă de kV Suprafața plăcilor individuale de redresare cu seleniu produse de industrie este de , cm Conectarea în paralel a plăcilor redresoare vă permite să obțineți un curent redresat de A de la unul bloc redresor (redresor GZh Ya U) Tehnologia de fabricație a redresoarelor cu seleniu de diferite serii poate avea propriile sale particularități În conformitate cu aceste caracteristici, polaritatea conexiunii directe poate fi opusă față de cea indicată în fig , adică o joncțiune electrică de rectificare poate fi creată lângă baza de aluminiu sau lângă electrodul superior proprietăți electrice CVC al unei plăci de redresor cu seleniu este prezentat în fig Densitatea maximă admisă de curent în direcția înainte pentru redresoarele cu seleniu de diferite serii nu depășește mA/cm , ceea ce este cu trei ordine de mărime mai mică decât pentru diodele cu siliciu și germaniu De aceea, pentru a redresa curenți mari, este necesară conectarea plăcilor redresoare cu seleniu în paralel chiar dacă există plăci de suprafață mare Tensiunea maximă directă pe o placă de redresor cu seleniu este de , , V (pentru diferite grupuri) Dar datorită faptului că tensiunea inversă maximă admisă a plăcilor redresoare cu seleniu nu depășește V, pentru redresare orez Structura plăcii redresoare cu seleniu: - baza din aluminiu; - un strat subțire de bismut sau nichel depus pe o bază de aluminiu gravat, ? - strat de seleniu; - strat de seleniura de cadmiu; - electrod dintr-un aliaj de bismut, cadmiu și staniu plăci de mitelny tensiuni înalte, este necesară conectarea unui număr mare de plăci în serie În acest caz, tensiunea directă pe coloana redresorului cu seleniu crește de atâtea ori cât numărul de plăci conectate în serie Capacitatea mare de barieră a redresoarelor cu seleniu la o densitate de curent direct admisibilă relativ scăzută limitează utilizarea lor la frecvențe ridicate Parametrii redresoarelor cu seleniu se modifică în timp, atât în timpul depozitării, cât și în timpul funcționării Stocarea pe termen lung duce la o creștere a curentului invers Acest proces, cunoscut sub numele de deformare, este cauzat de difuzia halogenurilor și de unele modificări în compoziția chimică a semiconductorului Desființarea, de regulă, este un proces reversibil După aplicarea unei tensiuni inverse sau alternative la redresor, curentul invers scade cu timpul, atingând valoarea nominală în minute Creșterea ireversibilă a tensiunii directe pe redresoarele cu seleniu, numită îmbătrânire, este nesemnificativă în timpul depozitării, dar se accelerează în timpul funcționării Procesul de îmbătrânire este asociat cu o creștere a rezistenței stratului de seleniu datorită epuizării sale în impurități de halogen, precum și cu o creștere a rezistenței tranziției ohmice dintre seleniu și electrodul de aluminiu Intensitatea acestor procese crește odată cu creșterea temperaturii, ceea ce determină limita superioară a intervalului de temperatură de funcționare a redresoarelor cu seleniu, care este de °C pentru diferite serii de redresoare Astfel, în mulți parametri și proprietăți, redresoarele policristaline cu seleniu sunt semnificativ inferioare diodelor redresoare cu siliciu monocristal și germaniu Cu toate acestea, utilizarea redresoarelor cu seleniu în diverse instalații rămâne largă, iar producția industrială a diferitelor tipuri de redresoare cu seleniu nu scade Acest lucru se datorează, în primul rând, simplității tehnologiei de fabricație a redresoarelor cu seleniu și, în consecință, costului redus al acestora În al doilea rând, o caracteristică pozitivă a redresoarelor cu seleniu este capacitatea lor

de a rezista la suprasarcini semnificative de curent și tensiune pe termen scurt și de a-și restabili rapid proprietățile după o defecțiune Defalcarea termică are loc atunci când curentul este ciupit cu o creștere bruscă a densității inversului curent la punctul de avarie Datorită creșterii puterii specifice eliberate la locul de defalcare, seleniul se topește, care apoi, la răcirea rapidă, trece în stare amorfă Rezistivitatea seleniului amorf este cu câteva ordine de mărime mai mare decât cea a seleniului cristalin Ca urmare, locul spart al plăcii de redresare este izolat, iar locul defecțiunii este "auto-vindecare" § DIODE DE PULS Scopul principal al diodelor pulsate este de a funcționa ca elemente de comutare ale computerelor electronice În plus, diodele în impulsuri sunt utilizate pe scară largă în electronica radio pentru detectarea semnalelor de înaltă frecvență și în alte scopuri Condițiile de funcționare ale diodelor de comutare corespund de obicei unui nivel ridicat de injecție, adică curenți directe relativ mari Prin urmare, proprietățile și parametrii diodelor în impulsuri sunt determinați de procesele tranzitorii discutate în § Orez Oscilograme ale curenților și tensiunilor unei diode în impulsuri în timpul funcționării acesteia în circuite cu un generator de tensiune (a) și cu un generator de curent ( ) La comutarea diodei de la înainte în invers, în momentul inițial de timp, un curent invers mare trece prin diodă, limitat în principal de rezistența de volum a bazei (cu un generator de tensiune ideal) În timp, purtătorii de sarcină minoritari acumulați în bază se recombină sau părăsesc baza prin joncțiunea pn, după care curentul invers scade la valoarea sa staționară (Fig , a) Tranziție Procesul în care rezistența inversă a unei diode semiconductoare este restabilită la o valoare constantă după o comutare rapidă de la înainte la invers se numește recuperarea rezistenței inverse a diodei În consecință, unul dintre principalii parametri ai unei diode în impulsuri este timpul de recuperare a rezistenței inverse tB C, care este egal cu intervalul de timp din momentul în care curentul trece prin zero după comutarea diodei de la un curent direct dat la o tensiune inversă dată stare până când curentul invers atinge o valoare scăzută dată În funcție de valoarea acestui parametru, toate diodele cu impuls sunt împărțite în șase grupuri, caracterizate printr-un timp de recuperare a rezistenței inverse de peste ns, , , , și mai puțin de ns Când un impuls de curent este trecut în direcția înainte prin diodă, se observă o creștere a tensiunii în primul moment după pornire (Fig , b) Acest lucru este cauzat de o cădere crescută de tensiune până când purtătorii de sarcină minori se acumulează în baza diodei ca urmare a injecției și scade rezistența de volum a bazei Tranzitoriul în care rezistența directă a unei diode semiconductoare se stabilește la o valoare constantă după pornirea rapidă a diodei în direcția înainte se numește rezistența directă a diodei În consecință, următorul parametru specific al diodei cu impulsuri este tensiunea directă a diodei / timpul stabilit, care este egal cu intervalul de timp din momentul în care impulsul curent direct este aplicat diodei (la tensiunea de polarizare inițială zero) până la tensiunea directă specificată peste diodă este atins Valorile acestor parametri (/res și /set) depind de structura diodei, de durata de viață a purtătorilor de sarcină minoritari din baza diodei și, de asemenea, de condițiile de măsurare Deci, cu o creștere a curentului continuu care trece prin diodă înainte de a trece la tensiunea inversă, timpul de recuperare a rezistenței inverse crește, ceea ce este cauzat de necesitatea de a absorbi o cantitate mai mare de purtători de sarcină minori acumulați în bază Odată cu creșterea tensiunii inverse în valoare absolută,

timpul de recuperare a rezistenței inverse scade, adică tensiunea inversă contribuie la procesul de resorbție a purtătorilor de sarcină minori de la baza diodei Cu toate acestea, dacă creșterea curentului invers în timpul comutării diodei este cauzată de o reîncărcare a capacității barierei (vezi §), atunci timpul de reîncărcare crește odată cu creșterea tensiunii inverse, ceea ce corespunde unei creșteri a timpului de recuperare a rezistenței inverse a diodei Una dintre primele care au fost dezvoltate a fost proiectarea unei diode cu impuls punctual (Fig) O diodă punctiformă constă dintr-un cristal de germaniu lipit pe un suport de cristal, un electrod de contact sub forma unui fir subțire și un bec de sticlă În astfel de diode se poate forma o joncțiune pn punctuală van cu ajutorul unui impuls de curent, în timpul căruia puterea eliberată încălzește regiunea semiconductorului sub contactul punctual, iar tipul de conductivitate electrică a acestei regiuni pro-contact se modifică datorită introducerii ionilor de impurități Această metodă (metoda de electroformare) face posibilă obținerea unei joncțiuni pn semisferice cu o rază de aproximativ µm și cu o durată scurtă de viață a purtătorilor de sarcină minoritari în baza de sub joncțiune O altă metodă diferă prin aceea că, în timpul trecerii unui impuls de curent, firul este sudat la semiconductor cu formarea unei joncțiuni p-n similare Orez Proiectarea uneia dintre diodele punctului de impuls: / - concluzii; - sticla de sticla; - cristal de germaniu; - electrod cu fir subțire Datorită duratei de viață scurte a purtătorilor de sarcină minoritari, timpul de recuperare a rezistenței inverse a diodelor punctiforme este mult mai mic decât cel al diodelor redresoare plane Capacitatea de barieră a unei joncțiuni punct pn este mică din cauza suprafeței mici a acestei joncțiuni Prin urmare, diodele punctiforme păstrează proprietățile redresorului până la zeci de megaherți O caracteristică a diodelor punctiforme este rezistența mare de bază, care în aceste diode este determinată de rezistența de răspândire rSì, adică rezistența regiunii semiconductoare situată în apropierea joncțiunii punctului pn, unde liniile de curent se îngroașă Deoarece rezistența la răspândire trebuie luată în considerare și în alte structuri ale diferitelor dispozitive semiconductoare, este de interes să se derivă o formulă generală pentru această rezistență Să determinăm rezistența unui cristal semiconductor sub o joncțiune pn emisferică sau sub orice altă joncțiune electrică emisferică cu raza a (Fig) Rezistența unui strat semiconductor emisferic de grosime dR la distanța R de centrul sferei dr=^· Rezistența totală a unui cristal semiconductor de grosimea b sub o joncțiune punctuală este suma rezistențelor straturilor emisferice Dacă rezistivitatea ρ este considerată constantă, atunci bÇdR = Q /J \ ~ R π \ a b)' Dacă raza a este mult mai mică decât grosimea cristalului b (în diode punctiforme a = µm, b " µm), atunci, neglijând valoarea / , se obține r æ ρ/(πα) (,) Pentru a obține valori suficient de mari ale tensiunii de rupere a joncțiunii pn, materialul semiconductor inițial trebuie să aibă o rezistivitate ridicată Dar, în același timp, rezistența de răspândire (rezistența bazei unei diode punctuale) va fi, de asemenea, mare, ceea ce va duce la o creștere a tensiunii directe pe diodă Din cauza unor neajunsuri semnificative Orez Structura diodei punctuale: - electrod de sârmă; - strat semiconductor cu conductivitate electrică de tip p statica diodelor punctiforme sunt practic au fost complet înlocuite de diode în impulsuri, a căror producție se bazează pe metode moderne productive și controlate pentru formarea joncțiunilor p-n folosind tehnologia plană, creșterea epitaxială și tehnologia fasciculului ionic În acest caz, siliciul și uneori arseniura de galiu

servesc ca principal material semiconductor inițial Pentru a accelera procesele tranzitorii în diodele cu impulsuri de siliciu și pentru a reduce valoarea timpului de recuperare a rezistenței inverse a acestor diode, în siliciul inițial se introduce o impuritate de aur Această impuritate asigură apariția nivelurilor de energie ale capcanelor de recombinare în banda interzisă a siliciului și o scădere a duratei de viață a purtătorilor minoritari La fabricarea diodelor cu impulsuri plane, difuzia impurităților se realizează prin găuri sau ferestre din stratul de oxid de siliciu (vezi §) Zona de joncțiune pn a unor astfel de diode poate fi suficient de mică, iar capacitatea barierei va fi, de asemenea, mică Tehnologia plană face relativ ușor formarea mai multor structuri de diode pe un singur cip În acest fel, se realizează seturi (ansambluri sau matrice) de diode pulsate, adică un set de diode pulsate asamblate într-un singur construcție, neconectate electric sau conectate prin aceleași concluzii Seturile de diode pulsate sunt convenabile pentru utilizarea în echipamentele informatice, dintre care nodurile individuale conțin un număr mare de diode pulsate de același tip § DIODE SCHOTKY Pentru toate diodele luate în considerare în paragrafele precedente, principalul proces fizic care limitează domeniul de frecvență de funcționare a fost acumularea și disiparea purtătorilor de sarcină minoritari în baza diodei Un alt proces fizic, supraîncărcarea capacității de barieră a joncțiunii electrice redresoare, a avut o importanță secundară în diodele considerate și le-a afectat proprietățile de frecvență doar în anumite condiții Prin urmare, au fost propuse cerințe pentru tehnologia de proiectare și fabricare a diodelor, a căror îndeplinire ar asigura accelerarea absorbției purtătorilor de sarcină minori acumulați în bază în timpul tensiunii directe Este clar că dacă excludem injectarea purtătorilor de sarcină minoritari în timpul funcționării diodei, atunci nu ar exista nicio acumulare a acestor purtători minoritari în bază și, în consecință, un proces relativ lent de absorbție a acestora Aici putem enumera câteva posibilități pentru eliminarea aproape completă a injectării purtătorilor de sarcină minoritari, păstrând în același timp proprietățile redresoare ale diodelor semiconductoare Utilizarea unei joncțiuni eterogene (heterojuncție) ca joncțiune electrică rectificatoare, adică o joncțiune electrică formată ca urmare a contactului semiconductorilor cu diferite benzi interzise Injectarea purtătorilor minoritari cu conexiune directă va fi absentă într-un număr de condiții și, în special, cu același tip de conductivitate electrică a semiconductorilor care formează o heterojoncție (vezi §) Această metodă de eliminare a injecției purtătorilor de sarcină minoritari nu și-a găsit încă aplicație largă în producția industrială de diode semiconductoare monocristaline din cauza dificultăților tehnologice Utilizați pentru a rectifica efectul tunelului (vezi §) Diode inversoare, adică utilizarea numai ramura inversă a caracteristicii I-V pentru redresare, împreună cu secțiunea corespunzătoare defalcării avalanșei Această metodă nu și-a găsit aplicație din cauza necesității ca fiecare diodă să aibă propria sa tensiune de polarizare, aproape egală cu tensiunea de defalcare În plus, zgomotul apare în stadiul inițial al defalcării avalanșei în diodă (vezi §) Utilizarea unei joncțiuni Schottky de redresare, adică a unei joncțiuni electrice de redresare formată ca urmare a acele contacte dintre metal și semiconductor La o astfel de tranziție, înălțimea barierei de potențial pentru electroni și găuri poate diferi semnificativ, așa cum se arată în § Prin urmare, atunci când joncțiunea Schottky de redresare este pornită în direcția înainte, curentul direct

apare din cauza mișcării purtătorilor majoritari de sarcină ai semiconductorului în metal, iar purtătorii de semn diferit (neprimari pentru semiconductor) practic nu pot trece de la metal la semiconductor datorită barierei de potențial ridicat pentru ele la joncțiune (vezi Fig) Astfel, pe baza joncțiunii Schottky redresoare, pot fi create diode semiconductoare redresoare, pulsate și cu microunde, care diferă de diodele cu joncțiune p-n prin proprietăți de frecvență mai bune Diode redresoare Schottky Proprietățile de frecvență ale diodelor Schottky ar trebui să fie afectate în principal de timpul de reîncărcare a capacității de barieră a joncțiunii Constanta de timp de reincarcare pentru- strat GaAs SOQ Epitaxi al - Sì "-", stratul epitaxial Orez Variante ale structurilor diodelor Schottky cu o bază cu două straturi depinde și de rezistența bazei diodei (t = gbSbar) Prin urmare, este mai oportun să se creeze o tranziție Schottky de rectificare pe un cristal semiconductor cu conductivitate electrică de tip n - mobilitatea electronilor este mai mare decât mobilitatea găurilor Din același motiv, concentrația de impurități într-un cristal semiconductor ar trebui să fie, de asemenea, mare Cu toate acestea, grosimea barierei potențiale Schottky care apare într-un semiconductor în apropierea interfeței cu metalul trebuie să fie suficient de mare Numai cu o grosime mare a barierei de potențial (joncțiunea Schottky) va fi posibilă, în primul rând, eliminarea probabilității ca purtătorii de sarcină să traverseze bariera de potențial, în al doilea rând, să se obțină valori suficiente ale tensiunii de defecțiune și, în al treilea rând, pentru a obține valori mai mici ale capacității barierei de joncțiune specifice (pe unitate de suprafață) Iar grosimea tranziției sau a barierei de potențial depinde de concentrația de impurități din semiconductor: cu cât concentrația de impurități este mai mare, cu atât tranziția este mai subțire (vezi §) Prin urmare, urmează cerința opusă a unei concentrații mai mici de impurități în semiconductor Luarea în considerare a acestor cerințe contradictorii pentru concentrația de impurități în semiconductorul original duce la necesitatea creării a bazei în două straturi a diodei Schottky (Fig) Partea principală a cristalului - substratul de aproximativ , mm grosime - conține o concentrație mare de impurități și are o rezistivitate scăzută Un strat subțire monocristal din același semiconductor (grosime de câțiva micrometri) cu aceeași conductivitate electrică de tip η poate fi obținut pe suprafața substratului prin metoda creșterii epitaxiale Concentrația donorului în stratul epitaxial ar trebui să fie semnificativ mai mică decât concentrația donorului din substrat Arsenaniura de siliciu sau galiu poate fi utilizată ca material semiconductor de pornire pentru diodele redresoare Schottky Cu toate acestea, în straturile epitaxiale de arseniură de galiu, nu a fost încă posibil să se realizeze o concentrație scăzută de defecte și o concentrație suficient de scăzută de donatori Prin urmare, tensiunea de defalcare a diodelor Schottky pe bază de arseniură de galiu este scăzută, ceea ce reprezintă un dezavantaj semnificativ pentru diodele redresoare Un electrod metalic este de obicei depus pe stratul epitaxial al unui semiconductor prin evaporare în vid, urmată de depunere pe suprafața stratului epitaxial Înainte de aplicarea unui electrod metalic, este oportun să se creeze ferestre în stratul de oxid pe suprafața semiconductorului folosind metode de fotolitografie Acest lucru facilitează obținerea unei tranziții Schottky de rectificare a zonei și configurației necesare Este de preferat să se fabrice diode redresoare de joasă frecvență cu o joncțiune pn Rectificarea diodelor Schottky în regiunea de joasă frecvență poate avea în viitor un avantaj

față de diodele cu o joncțiune p-n, asociată cu ușurința de fabricație Diodele Schottky ar trebui să aibă cele mai mari avantaje față de diodele cu o joncțiune p-n atunci când redresează curenți de înaltă frecvență Aici, pe lângă cele mai bune proprietăți de frecvență ale diodelor Schottky, trebuie remarcate următoarele caracteristici: tensiune directă mai mică datorită înălțimii mai mici a barierei de potențial pentru purtătorii de sarcină principali ai semiconductorului; o densitate mare de curent direct admisibilă maximă, care este asociată, în primul rând, cu o tensiune directă mai mică și, în al doilea rând, cu o bună disipare a căldurii de la joncțiunea Schottky de redresare Într-adevăr, stratul de metal situat pe o parte a joncțiunii Schottky depășește orice strat de semiconductor puternic dopat în conductivitatea sa termică Din aceleași motive, diodele redresoare Schottky trebuie să reziste la suprasarcini de curent semnificativ mai mari în comparație cu diodele similare cu joncțiune p-n bazate pe același material semiconductor O altă caracteristică a diodelor Schottky este idealitatea ramurii directe a CVC - ramura directă a CVC corespunde expresiei ( ) În același timp, cu o modificare a curentului direct în mai multe ordine de mărime, dependența lg/np = f(í np) este aproape liniară nu apar multiplicatori suplimentari în exponent atunci când curentul se modifică (vezi § și fig) Având în vedere această caracteristică, diodele Schottky pot fi folosite ca elemente logaritmice de mare viteză Pe fig arată CVC-ul unei diode Schottky de siliciu D , proiectată pentru un curent direct maxim admisibil de A Tensiunea directă pe diodă la un curent direct maxim admisibil de cel mult , V, tensiunea inversă maximă admisă pentru o diodă D B este de V Aceste diode permit trecerea impulsurilor de curent cu o durată de până la ms cu o perioadă de repetare de cel puțin minute cu o amplitudine de de ori mai mare decât curentul direct maxim admisibil Diodele sunt proiectate pentru o frecvență de curent rectificată de , MHz Diode de impuls Schottky Materialul semiconductor sursă pentru aceste diode poate fi, precum și pentru diodele redresoare Schottky, arseniura de siliciu sau galiu Dar aici ar trebui să se acorde preferință arseniurei de galiu, deoarece în acest material durata de viață a purtătorilor de sarcină minoritare poate fi mai mică de IO- s În ciuda absenței practice a injectării purtătorilor de sarcină minoritari prin joncțiunea Schottky atunci când este pornit în direcția înainte (ceea ce a fost deja notat mai devreme), la tensiuni directe ridicate și densități de curent direct, desigur, există o componentă de curent direct asociată cu injectarea purtătorilor de sarcină minoritari în semiconductor Prin urmare, cerința ca durata de viață a nonbazic purtători în materialul semiconductor original rămâne pentru diode Schottky pulsate Până în prezent, nu a fost posibilă obținerea de arseniură de galiu cu o concentrație scăzută de defecte, drept urmare diodele de arseniură de galiu au valori relativ scăzute ale tensiunilor de rupere, care sunt departe de a fi posibile teoretic Acesta este un dezavantaj semnificativ pentru diodele redresoare, dar nu atât de important pentru diodele de comutare, deoarece majoritatea circuitelor de comutare sunt circuite de joasă tensiune Diodele Schottky cu impulsuri de arseniură de galiu produse comercial (ZA A, ZA B, etc) sunt destinate utilizării în circuite de impulsuri cu intervale de pico și nanosecunde Spre deosebire de diodele redresoare Schottky, acestea au zone mult mai mici de joncțiuni de redresare Prin urmare, capacitatea totală a acestor diode nu depășește pF chiar și la tensiune de polarizare DC zero al-lea o ,A -bo°-uri; eu ~N °C\~ - , OL ¿ Yu MA Orez CVC al diodei de siliciu Schottky D la diferite temperaturi

Diodele Schottky cu microunde vor fi discutate în § , deși diodele în impulsuri cu arseniură de galiu ale mărcilor enumerate pot fi considerate și diode cu microunde în ceea ce privește proprietățile lor de frecvență, așa cum demonstrează marcarea lor § DIODE CU SHARP RECUPERAREA REZISTENTEI INVERSE După cum se poate observa din paragrafele precedente (vezi § , , și), atunci când se proiectează redresor de mare viteză și diode cu impuls, eforturile principale ar trebui îndreptate spre reducerea duratei proceselor tranzitorii și, mai ales, spre accelerare procesul de absorbție sau la eliminarea practic a efectului de acumulare a încărcăturii purtătorilor minoritari în bază prin eliminarea injectării purtătorilor minoritari Cu toate acestea, așa cum este adesea cazul, un proces fizic care este nedorit pentru unele dispozitive poate fi folosit ca bază pentru principiul funcționării altor dispozitive Acest lucru s-a întâmplat cu procesul de resorbție a purtătorilor de sarcină minori acumulați în baza diodei Dacă, cu pornire directă, o injecție de nebază purtători de încărcare în baza diodei, apoi atunci când aceasta este comutată la tensiune inversă, purtătorii minoritari acumulați vor fi absorbiți Pentru prima dată după Orez Oscilograme de tensiune (a) și curent (b) la comutarea diodei de la tensiune continuă la inversă: i\ - fază de conductivitate inversă ridicată; / - faza de decadere a curentului invers Rezistența de comutare a diodei este determinată numai de rezistența în vrac a bazei Procesul de resorbție a purtătorilor de sarcină minoritari poate fi împărțit în două faze (Fig) Durata primei faze t\ - faza de conductivitate inversă ridicată - este determinată de timpul din momentul în care curentul trece prin zero la comutarea diodei până când curentul invers începe să scadă În timpul primei faze în baza diodei în apropierea tranziției p-n, concentrația la limită a purtătorilor de sarcină minoritari scade la zero (vezi Fig , e) Durata acestei faze este depinde de numărul de purtători minoritari acumulați în bază, adică de curentul direct care precede comutarea și de amplitudinea curentului invers Amplitudinea curentului invers depinde, la rândul său, de tensiunea inversă aplicată diodei la comutare și de rezistența bazei, cu condiția ca dioda să funcționeze într-un circuit cu un generator de tensiune ideal În condiții reale, amplitudinea curentului invers este determinată de EMF al generatorului de tensiune inversă și de suma rezistențelor bazei diodei și a circuitului extern Durata celei de-a doua faze / - faza de decădere a curentului invers - este determinată de momentul în care curentul invers scade la o anumită valoare mică În a doua fază, purtătorii minoritari sunt absorbiți în continuare din straturile profunde ale bazei, precum și recombinarea lor în bază Cu o durată scurtă a celei de-a doua faze, impulsul de curent invers obținut prin comutarea diodei are o formă aproape dreptunghiulară Utilizarea diodelor cu o recuperare bruscă a rezistenței inverse în circuitele formatoarelor de impulsuri scurte de mare amplitudine este unul dintre scopurile principale ale acestor diode O altă posibilitate de aplicare este legată de faptul că un impuls scurt de amplitudine mare conține multe armonici de ordin superior, care pot fi izolate prin circuite Astfel, este posibil să se realizeze înmulțirea frecvenței oscilațiilor electromagnetice Alte diode pulsate pot fi, de asemenea, folosite pentru a forma impulsuri și a multiplica frecvența, dar acestea trebuie să fie cu injectarea de purtători de sarcină minori și cu o durată scurtă a dezintegrarii curentului invers, adică se impun cerințe specifice asupra structurii și proiectării diodelor cu o redresare bruscă a rezistenței inverse Într-o diodă fabricată prin metoda difuziei impurităților, o

distribuție neuniformă a impurităților necompensate poate exista și în afara joncțiunii p-n din bază Pentru o bază cu conductivitate electrică de tip η în absența curentului Jn = qn\inE + qDn grad η = De aici campul electric din baza in afara jonctiunii pn £ Dn gradn μη η Ținând cont de ionizarea totală a donatorilor și folosind relația Einstein, obținem £= ^Ș£adA q v Apariția unui câmp electric într-un semiconductor în prezența unui gradient de concentrație de impurități este cauzată de difuzia purtătorilor de sarcină (pentru un semiconductor cu un conductor electric de tip η - electroni) în locuri cu o concentrație mai mică Ca urmare a difuzării purtătorilor de sarcină, neutralitatea electrică a diferitelor părți ale semiconductorului este perturbată: pe de o parte, se obține un exces de purtători de sarcină (în exemplul nostru, electroni), pe de altă parte, impurități ionizate necompensate rămân (în exemplul nostru, donatori, adică sarcini fixe pozitive) După producere între sarcini opuse ale câmpului electric, care în acest caz este adesea numit câmp încorporat, set Orez , Structura diodei epitaxiale (a), distribuția impurităților în structura (b) și diagrama energetică a acestei structuri (c): xi este limita joncțiunii p-n în regiunea p; x este limita dintre regiunile p și n (limită metalurgică); xs este limita joncțiunii pn în regiunea n; x este grosimea stratului epitaxial; E este puterea câmpului electric încorporat în partea de înaltă rezistență a bazei se stabilește un echilibru dinamic între difuzia și deriva purtătorilor de sarcină Existența unui câmp electric în prezența unui gradient de concentrație de impurități poate fi ilustrată și folosind diagrame energetice La echilibru termodinamic, nivelul Fermi trebuie să fie orizontal Benzile de energie permise trebuie situate relativ la nivelul Fermi la o distanta in unitati de energie, in functie de concentratia de impuritati Cu o distribuție neuniformă a impurităților, marginile benzilor de energie (partea inferioară a benzii de conducție și partea superioară a benzii de valență) sunt oblice, ceea ce corespunde prezenței unui câmp electric Diagrama energetică a unei structuri de diodă cu o joncțiune p-n formată prin difuzie acceptor într-un strat epitaxial de înaltă rezistență crescut pe un substrat cu rezistență scăzută este prezentată în Fig , Astfel, un câmp electric poate exista în baza diodei în apropierea joncțiunii p-n, care este de obicei numit încorporat, deoarece apare în procesul de difuzie a impurităților și există în absența tensiunilor externe, adică în absența tensiunilor externe de curent În structura diodei prezentată în Fig , câmpul încorporat încetinește purtătorii de sarcină minori - găuri, injectate prin joncțiune la comutarea directă și accelerează mișcarea lor către joncțiune în timpul resorbției la comutarea inversă În acest caz, acumularea de purtători minoritari ar trebui să aibă loc numai în apropierea joncțiunii pn, iar durata dezintegrarii curentului invers ar trebui să fie scurtă Pentru a obține o accelerare semnificativă a procesului de resorbție a purtătorilor de sarcină minoritari, sunt necesare o intensitate mare a câmpului încorporat și, în conformitate cu ( ), un gradient mare de concentrație de impurități Cu toate acestea, o creștere a gradientului de concentrație a impurităților duce la o scădere a tensiunii de rupere (vezi §) și la o creștere a capacității de barieră a joncțiunii p-n (vezi §) În plus, la un nivel ridicat de injecție în baza diodei, în apropierea joncțiunii p-n apare un câmp electric, care este proporțional cu gradientul de concentrație al purtătorilor de sarcină minoritari injectați (vezi §) Această componentă a câmpului electric este direcționată către câmpul încorporat, iar valoarea sa poate depăși semnificativ valoarea câmpului

încorporat Pentru a obține rezistența minimă de bază, se alege un substrat de siliciu cu rezistență scăzută, cu o concentrație mare de donatori Între substratul cu rezistență scăzută și stratul epitaxial de înaltă rezistență crescut pe substrat, apare o barieră potențială pentru purtătorii minoritari - găuri injectate prin joncțiunea p-n atunci când este pornit direct Astfel, tranziția ohmică dintre substrat și stratul epitaxial (Fig) acționează și ca un limitator pentru zona de acumulare a purtătorilor de sarcină minoritari în baza diodei cu o recuperare bruscă a rezistenței inverse De cel mai mare interes practic sunt diodele cu o recuperare bruscă a rezistenței inverse, potrivite pentru formarea de impulsuri de curent dreptunghiulare cu durată de nano- și picosecundă, deoarece în acest interval diodele cu o recuperare bruscă a rezistenței inverse fac posibilă obținerea de rezultate care nu sunt realizabile prin alte metode La proiectarea unor astfel de diode destinate domeniului de microunde, este necesar să se prevadă o posibilă scădere a capacității și inductanței elementelor carcasei, conductoarelor interne și externe În plus față de parametrii care se aplică altor diode semiconductoare, următorii parametri specifici sunt utilizați pentru a evalua calitatea și funcționalitatea diodelor de recuperare rapidă a rezistenței inverse: Durata de viață efectivă a purtătorilor de sarcină minoritare t φ este timpul care determină procesul de recombinare a purtătorilor de sarcină minoritar în baza diodei Sarcina de comutare Q(tm) - o parte din sarcina acumulată care curge în circuitul extern atunci când direcția curentului se schimbă de la direct la invers Sarcina de comutare depinde de curentul direct care precede comutarea diodei și de tensiunea inversă aplicată diodei după comutare Prin urmare, atunci când se specifică valoarea taxei de comutare, trebuie indicate și condițiile pentru măsurarea acesteia Curentul invers de impuls maxim admisibil Iobr și valoarea maximă a curentului invers de impuls, care oferă chivaet fiabilitatea necesară a diodei Necesitatea introducerii acestui parametru este dictată de specificul funcționării diodelor cu o recuperare bruscă a rezistenței inverse De exemplu, pentru o diodă cu o recuperare bruscă a rezistenței inverse D B, curentul invers impulsiv maxim admisibil cu un ciclu de lucru egal sau mai mare de este de mA § ULTRA-ÎNALTĂ DIODE Diodele cu microunde semiconductoare au fost folosite de mult timp în diverse echipamente radio-electronice și echipamente de măsurare în domeniul microundelor, adică la frecvențe de peste MHz Inițial, diodele cu microunde au fost folosite pentru detectarea și amestecarea semnalului În aceste scopuri s-au folosit diode punctiforme, în care a avut loc o tranziție electrică de redresare între cristalul semiconductor și electrodul metalic de prindere sub forma unui arc ascuțit Noile tipuri de diode cu microunde create recent au înlocuit aproape complet detectorul punctual și diodele de amestecare Ele fac posibilă rezolvarea problemelor de generare și amplificare a oscilațiilor electromagnetice în domeniul microundelor, multiplicarea frecvenței, modularea, reglarea, limitarea semnalului etc Nu toate diodele cu microunde sunt luate în considerare aici, deoarece unele dintre diodele discutate în paragrafele precedente pot funcționa și la frecvențe de microunde (diode cu impuls, diode cu o recuperare bruscă a rezistenței inverse) Diode cu microunde cu un principiu specific de funcționare (diode tunel și inverse, varicaps, diode de tranzit avalanșă, generatoare Gunn) sunt discutate mai jos Diode de amestecare Un semnal și o tensiune sunt furnizate diodei de amestecare de la un generator special - un oscilator local În legătură cu neliniaritatea CVC-ului diodei, se formează un semnal de diferență

de frecvență (intermediară) Amplificarea suplimentară a semnalului de intrare se realizează la această frecvență intermediară, care ar trebui să fie mai mare decât frecvențele corespunzătoare zgomotului de joasă frecvență, invers proporțională cu frecvența Parametrul principal al diodelor de amestecare, care determină eficiența conversiei semnalelor de intrare de înaltă frecvență Pierderea în semnale de frecvență intermediară este parametrul ¿prb, numit pierdere de conversie a diodei de amestecare și egală cu raportul dintre puterea semnalului cu microunde la intrarea camerei diodei și puterea semnalului de frecvență intermediară eliberat în sarcina diodei de amestec în modul de funcționare: Lnp [dB] = g * pr h Majoritatea receptoarelor cu microunde nu au amplificatoare înaintea mixerului Prin urmare, sensibilitatea întregului receptor, capacitatea de a distinge semnalul util pe fundalul zgomotului, depinde de nivelul de zgomot al diodei de amestecare Nivelul de zgomot al unei diode de amestec (și al altor dispozitive) este estimat prin raportul de zgomot nsh - raportul dintre puterea nominală de zgomot a diodei în modul de funcționare și puterea nominală de zgomot termic a rezistenței active corespunzătoare la aceeași temperatură și aceeași bandă de frecvență Un alt parametru care caracterizează zgomotul unei diode de amestec și al altor dispozitive și sisteme este cifra de zgomot - raportul dintre puterea zgomotului la ieșire și acea parte a acesteia care este cauzată de zgomotul termic al sursei de semnal: F \u d (PcHrH / Rsh) p / (Рснн / Рш) afară \u d g Parametrul generalizat al receptorului, în mixerul căruia se utilizează o diodă cu anumite pierderi de conversie și raport de zgomot, este cifra de zgomot normalizată - valoarea cifrei de zgomot a receptorului cu o diodă de amestec la intrare cu o frecvență intermediară factor de zgomot al amplificatorului Fy¡Vh egal cu , dB: ^norm [dB] == Dirb [dB] θ lg(nm H~ FuCh) Unul dintre parametrii auxiliari ai diodelor de amestec este curentul redresat /vp - componenta constantă a curentului care curge în circuitul de ieșire al diodei în modul de funcționare Acest parametru este utilizat pentru a monitoriza starea diodei de amestecare și a oscilatorului local al receptorului, de la care o anumită putere de oscilații de microunde cu o anumită lungime de undă este furnizată diodei de amestecare Un alt parametru auxiliar este raportul de undă staționară de tensiune al diodei cu microunde - raportul de undă staționară a tensiunii în linia de transmisie cu microunde atunci când este încărcat pe o anumită cameră de diodă cu o diodă cu microunde în modul de funcționare Cu cât impedanța de intrare a camerei (cu o diodă) se potrivește mai bine cu impedanța caracteristică a căii, cu atât este mai mic raportul undelor staționare în ceea ce privește tensiunea și pierderea semnalului primit Cerințe de bază pentru covorașul semiconductor original - real, structura diodelor cu microunde și motivele acestor cerințe pot fi formulate după cum urmează Condițiile pentru obținerea proprietăților de frecvență necesare ale diodelor cu microunde sunt absența injectării purtătorilor de sarcină minoritari printr-o joncțiune electrică de rectificare în bază, o durată scurtă de viață a purtătorilor minoritari în bază și o valoare mică a constantei de timp de reîncărcare a capacității barierei , adică capacitatea de barieră scăzută a joncțiunii de redresare și rezistența de bază, care ar trebui să fie, de asemenea, scăzută pentru a reduce pierderile de putere în diodă Tensiunea de avarie, deși nu este un parametru al diodelor cu microunde, trebuie să fie mare În primul rând, acest lucru este necesar pentru a preveni detectarea pe ramura inversă a caracteristicii I-V a curentului de la oscilatorul local, care produce o tensiune alternativă cu o amplitudine relativ

mare În al doilea rând, acest lucru este necesar pentru a îmbunătăți fiabilitatea diodei cu microunde, deoarece impulsurile radio străine de mare putere pot intra în intrarea receptoarelor radio Pentru a asigura valori suficiente ale tensiunii de avarie, precum și pentru a reduce capacitatea barierei, concentrația de impurități în bază din apropierea joncțiunii electrice de redresare trebuie să fie scăzută, ceea ce contrazice cerințele pentru rezistența de bază scăzută Pentru a îmbunătăți fiabilitatea diodelor cu microunde, defalcarea acestora ar trebui să fie de avalanșă și nu termică, ceea ce are loc cu inevitabilul curent de șiretură (a se vedea §) Acest lucru implică faptul că materialul semiconductor inițial pentru diodele cu microunde ar trebui să aibă o bandă interzisă mare, o durată de viață scurtă a purtătorilor de sarcină minoritari și o mobilitate ridicată a purtătorilor de sarcină majori, adică, la o anumită concentrație de impurități, ar trebui să aibă o rezistivitate mai mică Un astfel de material, în special, este arseniura de galiu Diodele Schottky au devenit recent cele mai utilizate ca diode de amestecare cu microunde (vezi §) Joncțiunea electrică de redresare a acestor diode este formată prin depunerea de metal pe suprafața unui strat epitaxial de arseniură de galiu de înaltă rezistență folosind fotolitografie Dimensiunile joncțiunii de redresare depind de frecvența la care urmează să funcționeze dioda Pentru frecvențe foarte înalte (zeci și sute de gigaherți, ceea ce corespunde intervalului de lungimi de undă milimetrică), pentru a reduce capacitatea barierei, este necesar să se reducă diametrul tranziției Schottky la μm Astfel de dimensiuni se dovedesc a fi limitative pentru fotolitografia convențională, în special datorită gravării stratului protector de dioxid de sub masca de fotorezist în timpul gravării chimice a ferestrelor din stratul de dioxid Pentru a elimina acest fenomen, se folosesc metode de gravare ion-plasmă În plus, la frecvențe foarte înalte, pielea- desene variat Q) Orez , Proiectele unor diode cu microunde de tip cartuș (a) și coaxiale (b): - cristal semiconductor; - arc de contact; - manșon ceramic; - umplutură de etanșare efect într-un contact metalic formând o tranziție Schottky Prin urmare, pentru a crește raportul dintre perimetrul tranziției și zona sa, este necesar să se creeze tranziții inelare, benzi, cruciforme sau eliptice Pentru a menține o zonă mică a tranziției având o configurație complexă, lățimea inelului, benzilor etc ar trebui să fie mică (aproximativ μm) În acest caz, metoda fotolitografiei se dovedește a fi inacceptabilă Aici se folosesc metode de litografie cu raze X și metode de litografie cu fascicul de electroni, care au o rezoluție mult mai mare Pentru ușurința includerii în elementele relevante și în circuitele cu microunde (de exemplu, liniile de transmisie coaxiale și ghidul de undă), diodele cu microunde sunt proiectate în cazuri (Fig) Tipurile de carcase de diode cu microunde, dimensiunile lor generale și de conectare (precum și multe alte dispozitive semiconductoare) corespund GOST - (ST SEV -) Diode cu carcasă de cartuș, constând dintr-o bucșă ceramică și flanșe sau nipluri din alamă (Fig , a), sunt destinate utilizării în intervalele de lungimi de undă decimetrice și centimetrice, adică până la frecvențe de aproximativ GHz Diode cu un design de carcasă coaxială (Fig) sunt utilizate în domeniul undelor centimetrice scurte până la frecvențe de aproximativ GHz În domeniul undelor milimetrice, sunt utilizate în principal diode cu design de ghid de undă, adică inserții de ghid de undă, care sunt un fel de carcasă pentru diodele cu microunde Pentru liniile de bandă și microcircuite integrate cu microunde, se folosesc fie diode în pachete miniaturale, fie diode cu microunde fără pachet, a

căror suprafață a cristalului semiconductor este protejată doar de o peliculă de dioxid Designul carcasei unei diode cu microunde poate afecta semnificativ proprietățile de frecvență ale acesteia Pentru a reduce acest efect, capacitatea carcasei și inductanța cablurilor externe și interne ar trebui să fie minime Părțile metalice ale diodelor cu microunde sunt de obicei acoperite cu un strat subțire de argint sau aur, asigurându-le astfel rezistența minimă, contactul fiabil cu circuitele externe și protecția împotriva coroziunii * Diode detectoare La detectare, proprietatea de redresare a diodei este utilizată pentru a izola un semnal de frecvență mai mică de oscilațiile RF sau microunde modulate în amplitudine, care este apoi alimentat la intrarea amplificatorului (Fig) Unul dintre principalii parametri ai diodelor cu microunde detectoare Orez , Grafice care explică detectarea oscilațiilor de înaltă frecvență - extragerea unui semnal de frecvență inferioară din oscilațiile de înaltă frecvență cu amplitudine modulată este sensibilitatea curentului β/ este raportul dintre creșterea curentului redresat la o sarcină dată în circuitul de ieșire al diodei și puterea semnalului cu microunde furnizat la intrarea camerei diodei cu o diodă detector în modul de funcționare și provocând această creștere Sensibilitatea la curent a diodei detectoare depinde de curentul de polarizare direct CC (Fig prezintă o explicație grafică a detectării fără polarizare CC) Cele mai mari valori ale sensibilității curentului sunt de obicei apar adesea la un curent de polarizare direct de câteva zeci de microamperi, dar atunci când alegeți un curent de polarizare, este necesar să se țină seama de efectul acestuia asupra altor parametri parametrii Parametrul generalizat al diodei detectoare, care ține cont de diferitele proprietăți ale diodei și ale amplificatorului care o urmează (amplificator video), este factorul de calitate al diodei detectoare, care caracterizează sensibilitatea dispozitivului de recepție cu dioda detector și este determinat de formula M β/f dif unde Gdif este rezistența diferențială a diodei la o anumită polarizare pozitivă; nm este raportul de zgomot al diodei cu microunde; rsh este rezistența la zgomot echivalentă a amplificatorului video, care este de obicei considerată egală cu kOhm în calcule Cele mai bune diode detectoare cu microunde au un factor de calitate de peste W-I/ Aceste diode includ De exemplu, diode Schottky cu o structură epitaxială plană pe bază de arseniură de galiu AA A AA B, concepute pentru detectarea în intervalul de lungimi de undă centimetrică Diode de comutare Principiul de funcționare al unei diode de comutare se bazează pe o diferență mare în impedanța semnalului cu microunde cu un curent direct direct prin diodă și cu o tensiune continuă inversă pe diodă De aceea, traseul de microunde (ghid de undă, coaxial sau stripline) care urmează dispozitivul de comutare cu o diodă poate fi fie deschis, fie închis la semnalul de microunde De exemplu, în radarele cu matrice fază care conțin mii de elemente identice de antenă, diodele de comutare trebuie să furnizeze un impuls puternic de microunde fiecărui element în anumite momente în timp În acest caz, impulsurile emițătorului puternice nu ar trebui să cadă în canalul unui receptor sensibil Prin urmare, cerințele de bază pentru comutarea diodelor cu microunde sunt clare Ele trebuie să transmită puterea microundelor cu pierderi minime în starea de transmisie și nu în starea de blocare, să aibă o putere de disipare admisă mare, o tensiune mare de rupere, o capacitate proprie scăzută și o viteză de comutare suficient de mare Parametrul generalizat al diodei de comutare este frecvența critică fKp, care caracterizează eficiența diodei de comutare și este determinată de formula unde Cstr este capacitatea structurii;

gpr - rezistența la pierderi directe (componenta activă a impedanței diodei) la un anumit curent de polarizare directă; rvr - rezistență la pierderea inversă la o anumită tensiune de polarizare inversă Pentru a crește puterea de disipare admisă a diodei, este necesară creșterea ariei joncțiunii electrice de redresare, ceea ce implică o creștere a capacității barierei Prin urmare, majoritatea diodelor cu microunde comutatoare au o structură pZn, a cărei grosime a joncțiunii pn este semnificativ crescută datorită prezenței unui strat semiconductor de înaltă rezistență cu conductivitate electrică intrinsecă între regiunile p și η (Fig) În practică, structura pZn pentru comutarea diodelor cu microunde este formată pe cristalul inițial de siliciu cu o conductivitate apropiată de propria sa, adică fie cu o concentrație mică acceptori (stratul π), sau cu o concentrație scăzută de donatori (stratul v) Diagrama energetică, distribuția impurităților, densitatea sarcinii spațiale și câmpul electric în structurile p-i-p- și ρ-π-η- sunt prezentate în fig , Metodele de formare a acestor structuri sunt diferite: fuziunea și difuzia impurităților, creșterea epitaxială, dopajul ionic Orez , Diodă cu structură ρ-í-η (a); diagrama energetică (b), distribuția impurităților (c), densitatea sarcinii spațiale (d) și intensitatea câmpului electric (e) Diodele cu structură pZn se disting printr-o capacitate de barieră mai mică, care, în plus, depinde foarte puțin de tensiune (în special la concentrații mari de impurități în regiunile p și n) Independența practică a capacității structurii de tensiune se dovedește a fi o proprietate importantă a diodelor de comutare, deoarece o schimbare a capacității cu tensiunea poate provoca distorsiuni suplimentare de frecvență ale semnalului util Tensiunea de defalcare a diodelor cu structură pŻn ajunge la câteva sute de volți, ceea ce depășește semnificativ tensiunea de defalcare a diodelor cu o joncțiune p-n convențională și cu același nivel de dopare a regiunilor adiacente Pentru comutarea diodelor cu microunde ale unor mărci (A A-etc), puterea maximă admisă pe care o poate disipa o diodă în modul continuu este de de wați Asemenea diode sunt dispozitive cu cadru deschis, cu cabluri dure - suporturi pentru cristale - și un strat protector Diametrul lor este de mm, lungimea de , mm Dioda de comutare cu microunde poate funcționa în serie și în paralel cu linia de transmisie Într-un circuit paralel cu polarizare directă, dioda are o rezistență mică la derivația liniei, iar cea mai mare parte a puterii microundelor este reflectată înapoi Astfel, cu un circuit paralel, diferența de reflexie, și nu de absorbție, este utilizată pentru a comuta calea microundelor În diodă în sine, este absorbită o parte nesemnificativă a puterii microundelor incidente asupra acesteia, ceea ce permite unui dispozitiv de putere relativ scăzută să controleze zeci și sute de kilowați de putere pulsată a microundelor Dezavantajul comutării diodelor cu microunde cu structură pZn Motivul pentru aceasta este inerția procesului de resorbție a purtătorilor de sarcină (electroni și găuri) din stratul t la comutarea diodei din direcția înainte în direcția inversă, deoarece grosimea stratului t poate fi de câteva zeci de micrometri, iar viteza de deplasare a purtătorilor de sarcină este limitată Pot fi obținute viteze de comutare semnificativ mai mari folosind diode Schottky pe bază de arseniură de galiu Cu toate acestea, nivelul de putere comutată a microundelor în acest caz este cu câteva ordine de mărime mai mic decât atunci când se utilizează diode comutatoare cu microunde cu structură p-/p § STABILITRONI În diodele zener, trebuie să existe fie o avalanșă, fie o defecțiune a tunelului, deoarece numai cu aceste tipuri de defecțiuni sunt obținute caracteristicile I-V necesare pentru a stabiliza tensiunea (vezi § ,)

Datorită faptului că defalcarea avalanșelor este tipică pentru diodele realizate dintr-un semiconductor cu o bandă interzisă mare, siliciul este folosit ca material de pornire pentru diodele Zener Parametrul principal al diodelor zener este tensiunea de stabilizare - valoarea tensiunii de pe dioda zener atunci când trece un anumit curent de stabilizare (Fig) Tensiunea de defalcare a diodei și, prin urmare, tensiunea de stabilizare a diodei zener, depinde de grosimea joncțiunii pn sau de rezistivitatea bazei diodei (vezi Fig) Prin urmare, diferite diode Zener au tensiuni de stabilizare diferite (de la la V) Un parametru important al diodei Zener este coeficientul de temperatură al tensiunii de stabilizare ast - o valoare determinată de raportul dintre modificarea relativă a tensiunii de stabilizare și modificarea temperaturii ambientale la un curent de stabilizare constant: dUCr ^st lem min Sf lem max Orez , IV caracteristica unei diode zener const Deoarece coeficientul de temperatură al tensiunii de stabilizare depinde de temperatură, literatura de referință oferă valorile coeficientului mediu de temperatură al tensiunii de stabilizare pentru intervalul de temperatură de funcționare: UCT UCT Cp Δ ¿ ct I ΔΓ' /CT = CONst Valorile acestui parametru y sunt diferite pentru diferite diode zener Dependența generalizată a coeficientului de temperatură al tensiunii de stabilizare de tensiunea de stabilizare a multor diode zener este prezentată în fig , După cum se poate observa din figură, ast poate avea valori pozitive pentru tensiune relativ înaltă și negative pentru diodele zener de joasă tensiune, care este asociată cu o dependență diferită de temperatură a tensiunii de defalcare în timpul avalanșei și a tunelului joncțiunii pn (vezi § ,) Schimbarea semnului ast corespunde tensiunii de stabilizare ¿/CTæ V Diode zener de joasă tensiune ,k' , m , - , - O I - - , în , - , - Orez Dependențe generalizate ale coeficientului de temperatură al tensiunii de stabilizare și rezistenței diferențiale de tensiunea de stabilizare a diferitelor diode Zener fabricat din siliciu puternic dopat În acest sens, în diodele zener de joasă tensiune cu o tensiune de stabilizare mai mică de V, are loc defectarea tunelului, iar tensiunea de defalcare în timpul defecțiunii tunelului scade odată cu creșterea temperaturii (ast) Dintre diferitele tipuri de diode zener, cele mai multe sunt cu avalanșă O modalitate de a reduce coeficientul de temperatură cu tensiunea de stabilizare, care este utilizată pentru a crea diode zener de precizie compensate termic, constă în conectarea în serie cu joncțiunea p-p conectată înapoi a diodei zener a unei joncțiuni p-p suplimentare conectate în direcția înainte Odată cu creșterea temperaturii, tensiunea la joncțiunea pn conectată în direcția înainte scade (vezi §), ceea ce compensează creșterea tensiunii la joncțiunea pn inversată în timpul defectării sale de avalanșă Calitatea unei diode Zener, adică capacitatea sa de a stabiliza tensiunea atunci când curentul de trecere se modifică, poate fi judecată după valoarea rezistenței diferenţiale a diodei Zener rCTì, care este determinată de raportul dintre creșterea tensiunii de stabilizare și mic increment de curent care a provocat-o Deoarece anumite modificări de curent pentru o mai bună stabilizare trebuie să corespundă unor modificări minime de tensiune, calitatea diodei zener este mai mare dacă are o rezistență diferențială mai mică Dependența generalizată a rezistenței diferențiale de tensiunea de stabilizare a multor diode zener este prezentată în fig , Pentru fabricarea de diode zener de înaltă tensiune cu avalanșă, este necesar ca material semiconductor de pornire siliciu de înaltă rezistență Cu cât este mai mare tensiunea de stabilizare necesară, cu atât ar trebui să fie mai mare rezistivitatea siliciului

original În timpul funcționării diodei zener, adică în timpul ionizării de impact în joncțiunea p-n, rezistența de volum a bazei diodei zener de înaltă tensiune afectează valoarea rezistenței diferențiale Prin urmare, cu o creștere a tensiunii de stabilizare, rezistența diferențială Orez , Diagrame energetice care explică creșterea rezistenței diferențiale cu scăderea tensiunii de stabilizare pentru diodele Zener cu ruperea tunelului: a - pentru o diodă Zener cu o tensiune de avarie ¿Lirob b - pentru o diodă Zener cu o tensiune de avarie Uu rob ^prob I Rezistența diodelor zener de înaltă tensiune crește Prin urmare, este, de asemenea, clar că este oportun să se formeze joncțiuni p-n ale diodelor zener de înaltă tensiune într-un strat subțire de siliciu epitaxial de înaltă rezistență crescut pe un substrat cu rezistență scăzută Pentru diodele zener de joasă tensiune cu defalcare de tunel, pe măsură ce concentrația de impurități crește, grosimea joncțiunii pn scade, ceea ce duce la scăderea tensiunii de rupere și a tensiunii de stabilizare Să luăm acum în considerare motivele creșterii rezistenței diferențiale a diodelor zener de joasă tensiune cu o scădere a tensiunii de stabilizare a acestora (partea stângă a graficului prima \u d f (t / CT) în Fig) Pentru comparație, în fig prezintă diagramele energetice a două diode zener de joasă tensiune cu tensiuni de stabilizare diferite Pentru a tunel purtătorii de sarcină prin joncțiunea pn, în primul rând, grosimea Δ a barierei de potențial prin care electronii trebuie să fie tunelată trebuie să fie mică Această grosime a barierei de potenţial se va obţine la o anumită intensitate a câmpului electric sau unghiul de înclinare a benzilor de energie, deoarece E ~ tga În al doilea rând, tunelul necesită prezența electronilor pe o parte a joncțiunii p-n (în acest caz, în banda de valență a regiunii p) și niveluri de energie liberă corespunzătoare acelorași valori de energie, de cealaltă parte a joncțiunii pn (în acest caz, în banda de conducere a regiunii η) Ambele condiții au apărut în două diode Zener comparate la tensiuni diferite de defalcare Dar direct sub partea superioară a benzii de valență, există semnificativ mai puține regiuni p de electroni decât la niveluri mai profunde ale benzii de valență Acest lucru este valabil mai ales pentru a doua dintre diodele zener comparate, concentrația de impurități în care este mult mai mare Prin urmare, cu o creștere suplimentară a tensiunii inverse, creșterea numărului de electroni capabili de tunel în prima diodă zener se dovedește a fi mult mai mare decât în a doua Prin urmare, rezistența diferențială a primei diode zener trebuie să fie mai mică decât a doua Gama de curenți în care dioda Zener poate îndeplini funcțiile de stabilizare a tensiunii este stabilită din următoarele considerații Curentul minim admisibil de stabilizare /st min este determinat de faptul că la curenți scăzuti, în primul rând, rezistența diferențială se dovedește a fi și mai mare și, în al doilea rând, la diodele Zener cu avalanșă, zgomotul apare în stadiul inițial din cauza instabilității a procesului de ionizare prin impact Odată cu creșterea curentului prin diodele zener, se stabilește procesul de ionizare prin impact și zgomotul dispare Curentul de stabilizare maxim admisibil /stmax este determinat de puterea de disipare permisă pentru un dispozitiv dat și de necesitatea de a asigura fiabilitatea specificată a dispozitivului, adică depinde de zona joncțiunii pn și de proiectarea dispozitivului Din punct de vedere structural, diodele Zener sunt proiectate în mod similar cu redresoarele și alte diode, adică în carcase din metal-sticlă, sticlă și plastic, precum și în formă neambalată cu un strat protector În funcție de zona tranziției p-n și de designul designului, diodele zener pot avea o putere maximă

admisă de la zecimi la de wați Tranzițiile electron-gaură în fabricarea diodelor zener sunt formate prin metodele de fuziune și difuzie a impurităților La topirea sau difuzarea aceleiași impurități pe ambele părți ale unui cristal de siliciu, se pot forma simultan două joncțiuni p-n, care, atunci când se aplică tensiune în regiunile extreme ale structurii, se vor dovedi a fi pornite în direcții opuse Așa sunt realizate diode Zener cu un CVC simetric - diode Zener cu doi anozi destinate utilizării în circuite de stabilizare a tensiunii de polaritate diferită și pentru protejarea diferitelor elemente ale circuitelor electrice de supratensiunile ambelor polarități § STABISTORI O trăsătură distinctivă a stabistorilor în comparație cu diodele zener este tensiunea de stabilizare mai mică, determinată de căderea de tensiune directă pe diodă și este de aproximativ , V Conectarea a două sau trei stabistoare în serie face posibilă obținerea unei valori duble sau triple a tensiune de stabilizare Unele tipuri de stabistori sunt un singur dispozitiv cu o conexiune în serie de elemente individuale Stabistorii au un coeficient de temperatură negativ al tensiunii de stabilizare, adică tensiunea pe stabistor la un curent constant scade odată cu creșterea temperaturii Acest lucru se datorează, în primul rând, scăderii înălțimii barierei de potențial la joncțiunea p-n cu creșterea temperaturii (vezi §) și, în al doilea rând, redistribuirii purtătorilor de sarcină în energie, care, odată cu creșterea temperaturii, duce la o trecerea prin bariera potențială mai mulți purtători Datorită coeficientului de temperatură negativ al tensiunii de stabilizare și a neliniarității caracteristicii I-V, care asigură stabilizarea tensiunii, stabistorii sunt utilizați pentru compensarea temperaturii diodelor zener cu un coeficient de temperatură pozitiv al tensiunii de stabilizare Pentru a face acest lucru, unul sau mai mulți stabistori trebuie să fie conectați în serie cu dioda zener Partea principală a stabistorilor sunt diode de siliciu, care diferă de diodele redresoare convenționale prin faptul că joncțiunile p-n pentru stabistori sunt formate din siliciu cu rezistență scăzută Acest lucru este necesar pentru a obține o rezistență de volum mai mică a bazei și, în consecință, o rezistență diferențială mai mică a stabistorului Rezistența de bază poate afecta valoarea rezistenței diferențiale a stabistorului, deoarece joncțiunea sa p-n este polarizată înainte în timpul funcționării și are rezistență scăzută Datorită rezistivității scăzute a siliciului original, grosimea joncțiunii p-n și tensiunea de defalcare a stabistorilor se dovedesc a fi foarte mici, dar stabistorii sunt proiectați să funcționeze cu conexiune directă Tensiunea inversă pe ele poate apărea numai în timpul tranzitorii într-un anumit circuit Tensiunea inversă maximă admisă în timpul tranzitorii nu depășește de obicei câtiva volți pentru stabistori Pe lângă stabistorii de siliciu, industria produce și stabistori de seleniu policristalin, care sunt ușor de fabricat și, prin urmare, cu costuri mai mici in orice caz Stabistorii cu seleniu au o durată de viață garantată mai scurtă (h) și un interval restrâns de temperatură de funcționare (- + °C) § DIODE DE ZGOMOT În etapa inițială a defalcării avalanșei, așa cum s-a menționat în § , procesul de ionizare prin impact se dovedește a fi instabil: ionizarea prin impact apare, se rupe și apare din nou în acele locuri ale joncțiunii p-n unde există o intensitate suficientă a câmpului electric la momentul dat Rezultatul neuniformității aleatorii în generarea de noi purtători de sarcină în timpul ionizării de impact este zgomotul, care este caracteristic unui anumit interval de curenți (vezi Fig) În timpul funcționării unor astfel de dispozitive, de exemplu, precum diode Zener, zgomotul este un fenomen dăunător De

aceea, gama de curenți corespunzătoare zgomotului este exclusă din gama de curenți de funcționare a diodelor zener Cu toate acestea, pentru diferite măsurători în inginerie radio, sunt necesare generatoare de tensiune de zgomot Astfel, o diodă poate fi folosită ca generator de tensiune de zgomot în domeniul curenților inversi de la minim /probtip până la maxim /promax al curentului de avarie, unde se observă cea mai mare intensitate a fluctuațiilor electrice Deci, pentru diodele de zgomot KG A KG V, acest domeniu corespunde valorilor curente de µA mA Parametrii principali ai diodelor de zgomot sunt densitatea spectrală a zgomotului Sh - valoarea efectivă a tensiunii de zgomot, referită la Hz, la un curent de rupere dat, precum și frecvența de limită a uniformității spectrului frp - cea mai înaltă frecvență a spectrului la care cerința specificată pentru neuniformitatea densității spectrale este satisfăcută față de zgomotul de deviație negativă (la un curent de avarie dat) Unul dintre parametrii de referință ai diodelor de zgomot este coeficientul mediu de temperatură al densității spectrale a zgomotului TK Sh - raportul dintre modificarea relativă a densității spectrale a zgomotului într-un anumit interval de temperatură de funcționare și modificarea absolută a temperaturii ambientale la curent continuu: mk s = i I w shsr ΔΓ I/prob == const Curentul invers care precede defectarea avalanșei și tensiunea de defalcare în timpul defectării avalanșei cresc cu creșterea temperaturii Ca rezultat, secțiunea caracteristică I-V corespunzătoare celei mai mari intensități de zgomot se schimbă cu schimbările de temperatură în regiunea curenților și tensiunilor mari Prin urmare semnează iar valoarea coeficientului de temperatură al densității spectrale a zgomotului poate fi diferită la diferiți curenți constanți, la care se măsoară TC Sh al diodei de zgomot § DIODE DE ZBOR AVALANCHE Generarea de oscilații electromagnetice de microunde poate avea loc în diode cu structuri diferite Ca exemplu, luați în considerare procesele care au loc în structura p+-p-p+ la o tensiune inversă care are o componentă constantă și o componentă variabilă Când tensiunea totală depășește tensiunea de defalcare, începe ionizarea de impact - o defecțiune de avalanșă Perechi electron-gaură generate în partea îngustă a joncțiunii pn Orez , Structura diodei de avalanșă (a), distribuția intensității câmpului electric peste structura (b) și poziția punctului de operare (polarizare constantă) pe CVC (c) Despre h V) lângă limita metalurgică, unde intensitatea câmpului electric este suficientă pentru ionizarea prin impact, sunt separate de câmp (Fig) Curentul cauzat de mișcarea noilor purtători de sarcină trece până când acești purtători părăsesc joncțiunea p-n În timpul zborului purtătorilor de sarcină prin joncțiune (în exemplul nostru, electroni), tensiunea pe diodă poate avea timp să scadă dacă frecvența componentei variabile este mare Astfel, datorită timpului finit de zbor al purtătorilor, apare o defazare între curentul care trece prin diodă și tensiunea alternativă de înaltă frecvență aplicată acestei diode Defazatul dintre curent și tensiune este determinat nu numai de timpul de zbor, ci și de inerția procesului dezvoltarea unei avalanșe în timpul ionizării de impact Într-adevăr, momentul în care un purtător de sarcină dobândește suficientă energie pentru ionizare, cel mai probabil, nu coincide cu momentul ciocnirii acestui purtător cu unul dintre atomii semiconductorului, adică cu momentul ionizării În plus, este nevoie de ceva timp pentru a dobândi energie suplimentară Să presupunem că timpul de zbor, împreună cu timpul determinat de inerția ionizării la impact, este egal cu jumătate din perioada de oscilație a unei anumite frecvențe a tensiunii alternative (Fig , a) În acest caz, curentul

alternativ prin diodă va rămâne cu o jumătate de ciclu în urma tensiunii alternative care a provocat-o O creștere a tensiunii va fi întotdeauna însoțită de in absenta DESPRE DESPRE Orez , Dependențe de tensiuni și curenți, ilustrând apariția unei rezistențe diferențiale negative a unei diode cu avalanșă: a - cu o defazare de °, care are loc la frecvențe înalte ale componentei variabile a tensiunii; b - la o defazare de °, corespunzătoare frecvențelor inferioare ale componentei variabile a tensiunii și absența rezistenței diferențiale negative în medie pe perioada să fie dată de o scădere a curentului, iar o scădere a tensiunii, dimpotrivă, de o creștere a curentului Acest lucru indică faptul că pentru o anumită frecvență a tensiunii alternative în timpul întregii perioade de oscilație, condiția rezistenței diferențiale negative este îndeplinită Odată cu o scădere a frecvenței tensiunii alternative (cu creșterea perioadei de oscilație), curentul va rămâne în urma tensiunii cu un unghi mai mic de °, deoarece timpul de zbor și inerția ionizării la impact rămân aceleași Când, cu scăderea frecvenței tensiunii alternative, defazajul între curent și tensiune va fi de un sfert din perioadă, condițiile de rezistență diferențială negativă vor fi îndeplinite doar pentru jumătate din perioadă, alternând fiecare trimestru al perioadei cu condiţii de rezistenţă diferenţială pozitivă (Fig) În această limită caz, în medie pe parcursul perioadei, dioda de avalanșă nu va avea o rezistență diferențială negativă În mod similar, cu o creștere a frecvenței tensiunii alternative, rezistența diferențială negativă dispare atunci când defazarea dintre curent și tensiune atinge ° Astfel, diodele cu avalanșă au o rezistență diferențială negativă doar pentru oscilațiile cu microunde rezistență diferențială pentru generare și amplificare Ерроб Orez , Distribuția intensității câmpului electric în regiunea n ușor dopată a joncțiunii p-n la diferite momente de timp în timpul funcționării diodei de tranzit avalanșă în regim cu plasmă prinsă cu faptul că structura transportatorilor Orice dispozitiv cu tensiune negativă poate fi folosit pentru oscilații electromagnetice Diodele de tranzit în avalanșă sunt folosite pentru a genera oscilații cu microunde de mare putere În acest caz, nu este necesar să se aplice o tensiune alternativă cu frecvența necesară diodei cu intervalul de avalanșă, ceea ce am făcut mental atunci când luăm în considerare principiul de funcționare al dispozitivului Dioda de avalanșă, împreună cu camera de rezonanță în care este plasată de obicei, este capabilă să se izoleze de impulsurile care apar în timpul aplicării unei polarizări constante și să amplifice oscilațiile de o anumită frecvență Diodele de tranzit avalanșă au fost create pentru prima dată în URSS pe baza descoperirii de către A S Tager cu co lucrătorii efectului de generare și amplificare a oscilațiilor cu microunde în timpul defalcării avalanșei Pe lângă modul de operare de tranzit de avalanșă considerat, care în literatura engleză este numit modul IMPATT (prescurtare de la impact ionization avalanche transit time), diodele de tranzit de avalanșă pot funcționa și în modul trapped plasma sau TRAPATT (trapped plasma triggered transit)) Principiul de funcționare în acest mod de funcționare este legat de rata de redistribuire a câmpului electric în diodă care poate depăși semnificativ rata de derive a sarcinii Pe fig arată distribuția intensității câmpului electric în regiunea η ușor dopată a structurii p + -n-p + a diodei de tranzit de avalanșă în diferite momente după pornirea diodei pentru o tensiune inversă care depășește tensiunea de rupere În primul moment (Λ) Avalanşă intensitatea câmpului electric este maximă lângă limita metalurgică Tocmai aici, din cauza ionizării de impact, începe formarea unei plasme

cu gaură de electroni, ceea ce duce la o redistribuire a câmpului electric în regiunea d În următorul moment de timp (/), ionizarea de impact va avea loc în stratul vecin al regiunii η Viteza de deriva a purtătorilor de sarcină este limitată chiar și în câmpuri electrice puternice de viteza de saturație (vezi Fig) Viteza de derivă a electronilor din plasmă poate fi mult mai mică decât viteza de saturație dacă intensitatea câmpului electric din stratul de plasmă are timp să scadă Redistribuirea intensității câmpului electric poate avea loc mai rapid dacă sursa de alimentare cu diodă asigură o densitate mare de curent prin diodă (ținând cont de densitatea curentului de polarizare), ceea ce este confirmat de formula ( ) și dacă concentrația de impurități în regiunea dopată este suficient de scăzută Ca rezultat, frontul de undă de ionizare traversează rapid întreaga regiune η, care este umplută cu o plasmă cu gaură de electroni foarte conductivă Intensitatea câmpului electric în acest moment (/z în Fig) și tensiunea pe diodă devin mici, ceea ce duce la o disipare relativ lentă a purtătorilor de plasmă din joncțiunea pn Întârzierea extragerii purtătorilor din joncțiunea p-n a dus la denumirea de "regim de plasmă prinsă" Deoarece viteza mișcării direcționate a purtătorilor de sarcină în diodele de tranzit de avalanșă în modul cu plasmă prinsă este mult mai mică decât rata de saturație, frecvența oscilațiilor generate de obicei nu depășește THz, în timp ce în modul de tranzit de avalanșă această frecvență poate fi de câteva sute de gigaherți Alte diferențe de proprietăți și parametri pentru diferite moduri de funcționare se datorează faptului că, în modul de zbor cu avalanșă, o scădere a vitezei de deriva sub viteza de saturație este nedorită și invers în modul cu plasmă prinsă Prin urmare, se poate obține o amplitudine mare de oscilații în regimul cu plasmă prinsă - până la câteva sute de kilowați în funcționare în impulsuri (până la câtiva wați în funcționare continuă) Și deoarece tensiunea pe diodă se dovedește a fi mică la curenți mari și, dimpotrivă, mare la curenți mici, eficiența ajunge la % pentru arseniura de galiu și diodele de siliciu Diodele de tranzit de avalanșă au un nivel ridicat de zgomot inerent ionizării prin impact, deoarece micile abateri aleatorii ale curentului (zgomot de împușcare) printr-o joncțiune electrică sunt amplificate prin ionizarea impactului cu un factor egal cu factorul de multiplicare a avalanșei AÍ Prin urmare, diodele de tranzit de avalanșă sunt folosite doar pentru a genera oscilații cu microunde și nu sunt folosite pentru a amplifica semnale slabe Prin urmare, defalcarea avalanșelor este utilizată pentru a crea diode de zgomot § DIODE DE TUNEL Structura și principiul de funcționare Spre deosebire de toate celelalte diode semiconductoare, diodele tunel sunt fabricate folosind un material semiconductor cu o concentrație foarte mare de impurități (IO IO cm-) O consecință a concentrației mari de impurități în regiunile adiacente joncțiunii p-n este, în primul rând, și) Orez , CVC și diagrame energetice ale diodei tunel la: a - fără tensiune; b - tensiune directă mică; c - tensiune de vârf; g - tensiunea corespunzatoare rezistentei diferentiale negative; d - stres prin jgheab; e este tensiunea soluției care determină un curent de injecție semnificativ; g - tensiune inversă grosime mică a joncțiunii (aproximativ IO- μm), adică cu două ordine de mărime mai mică decât în alte diode semiconductoare Tunnelarea purtătorilor de sarcină este posibilă prin astfel de bariere subțiri de potențial (vezi §) O altă consecință a unei concentrații mari de impurități este împărțirea nivelurilor de energie a impurităților odată cu formarea benzi de energie a impurităților, care sunt adiacente benzii de conducere din regiunea η și benzii de valență din regiunea p

În acest caz, nivelurile Fermi se dovedesc a fi situate în zonele permise (Fig) Într-o diodă fără tensiune externă, există un tunel de electroni din regiunea η în regiunea p și invers Contrafluxurile de electroni sunt egale, deci curentul total prin diodă este zero (Fig , a) Cu o tensiune directă mică pe dioda tunel, înălțimea barierei de potențial a joncțiunii pn scade sau diagrama de energie a regiunii p se deplasează în raport cu diagrama de energie a regiunii p Nivelurile de energie liberă ale regiunii p (ocupate de găuri), situate direct deasupra nivelului Fermi, sunt la aceeași înălțime în diagrama energetică sau la aceleași valori cu nivelurile de energie ale regiunii η ocupate de electroni (Fig ,) Prin urmare, va exista un tunel preferențial al electronilor din regiunea n în regiunea p Cu o tensiune directă pe diodă, când nivelurile de energie liberă ale benzilor de valență și impurități ale regiunii p vor fi la aceeași înălțime cu nivelurile de energie ale benzii de conducție și ale benzii de impurități ale regiunii η ocupate de electroni , curentul de tunel prin diodă va fi maxim (Fig , c) Odată cu o creștere suplimentară a tensiunii directe pe diodă, curentul de tunel prin diodă va scădea, deoarece din cauza deplasării diagramelor de energie, numărul de electroni capabili să facă tunel din regiunea η în regiunea p va scădea (Fig , , d) Curentul de tunel prin diodă se va dovedi a fi egal cu zero la o tensiune directă și mai mare, atunci când, datorită deplasării relative a diagramelor energetice ale regiunilor n și p pentru electronii liberi din regiunea η, există nu vor exista niveluri de energie liberă în regiunea p (Fig) Cu toate acestea, în acest caz, un curent continuu va trece prin diodă, datorită tranziției purtătorilor de sarcină prin bariera de potențial coborâtă a joncțiunii pn, adică curentul asociat cu injecția Odată cu o creștere suplimentară a tensiunii directe datorită scăderii înălțimii barierei de potențial, curentul direct prin dioda tunel va crește, ca în diodele redresoare convenționale (Fig , e) Cu o tensiune inversă pe dioda tunel, apar din nou condițiile pentru tunelarea electronilor (Fig , g) Abia acum electronii fac un tunel de la banda de valență a regiunii p la banda de conducere a regiunii n Curentul invers care apare în acest caz va crește odată cu creșterea tensiunii inverse în valoare absolută Dioda tunel are o conductanță de tensiune inversă relativ mare Se poate presupune că defectarea tunelului are loc într-o diodă tunel la tensiuni inverse neglijabile Astfel, dioda tunel are o rezistență diferențială negativă pe o gamă de tensiuni directe Aceasta este cea mai interesantă proprietate a diodei tunel, deoarece orice dispozitiv cu o rezistență diferențială negativă poate fi utilizat pentru a genera și amplifica oscilații electromagnetice, precum și în circuitele de comutare ,% GaSb GE - L JГ Ga As Ί ! , ¿ , ,V Orez , Caracteristicile I-V ale diodelor de tunel din diverse materiale semiconductoare Opțiuni Industria produce diode tunel din arseniură de galiu și din germaniu Caracteristicile lor volt-amper sunt prezentate în fig , Din figură se poate observa că cu cât banda interzisă a semiconductorului inițial este mai mare, cu atât rezistența diferențială negativă este mai mare la tensiuni mai mari Diodele tunel sunt caracterizate de parametri specifici (vezi Fig): Curent de vârf /p - curent continuu în punctul de caracteristică I-V maximă, la care valoarea di/du este egală cu zero Acest curent este diferit pentru diodele tunel pentru diferite scopuri Valoarea sa poate varia de la zecimi de miliamperi la sute de miliamperi Curent minim /v - curent continuu în punctul de minim CVC, la care valoarea di / du este egală cu zero Raportul curenților diodei tunel /p//v este raportul dintre curentul de vârf și curentul de vale

Pentru diode tunel din arseniură de galiu /n//v ^ , pentru diode tunel cu germaniu /n//v = = Tensiunea de vârf Un este tensiunea directă corespunzătoare curentului de vârf Pentru diodele tunel cu arseniură de galiu £ n = mV, pentru diode cu germaniu ¿ n = mV Tensiunea de vale Í B este tensiunea directă corespunzătoare curentului de vale Pentru diode tunel cu arseniură de galiu Í B = mV, pentru germaniu Í B = mV Tensiune soluție Upp - tensiune directă, mai mare decât tensiunea de vale, la care curentul este egal cu vârful Capacitatea specifică a diodei tunel Sd / / P - raportul dintre capacitatea diodei tunel la curentul de vârf Frecvența rezistivă limită fR este frecvența calculată la care dispare componenta activă a impedanței unui circuit în serie format dintr-o joncțiune pn și rezistență de pierdere Frecvența de rezonanță a diodei tunel fo este frecvența calculată la care reactanța totală a joncțiunii pn și inductanța carcasei diodei tunel dispare Dependențe de temperatură ale parametrilor O modificare a temperaturii unei diode tunel poate afecta componenta curentului tunel și componenta legată de injecție în moduri diferite Următorii factori fizici pot influența dependența de temperatură a componentei curentului tunelului Odată cu creșterea temperaturii, banda interzisă a arseniurii de galiu și germaniu, principalele materiale semiconductoare de pornire pentru diodele tunel, scade O scădere a benzii interzise duce la o scădere a grosimii barierei de potențial prin care electronii tunelesc, în timp ce probabilitatea tunelării crește Componenta curentului de tunel și în special creșterea curentului de vârf Pe măsură ce temperatura crește, distribuția electronilor peste nivelurile de energie se modifică - numărul de electroni sub nivelul Fermi în banda de conducere a regiunii η scade, deoarece unii dintre electronii liberi merg la niveluri de energie mai înalte, iar Fermi nivelul se schimbă în jos Prin urmare, numărul de electroni care pot tunel din regiunea η în regiunea p scade Componenta de tunel a curentului direct este redusă Deoarece acești factori acționează, ca să spunem așa, în direcții diferite, influența lor totală, în primul rând, trebuie să fie mică, iar în al doilea rând, poate duce atât la creșterea, cât și la o scădere a curentului de vârf al diodei tunel odată cu creșterea temperaturii Componenta de injecție a curentului unei diode tunel crește odată cu creșterea temperaturii din două motive, care au loc și în diodele redresoare (vezi §): o scădere a înălțimii barierei de potențial și o redistribuire a purtătorilor de sarcină peste nivelurile de energie Prin urmare, într-o diodă tunel, curentul de vale crește odată cu creșterea temperaturii Proprietățile de frecvență ale diodelor tunel Mecanismul de acțiune al diodelor tunel este asociat cu tunelarea electronilor printr-o barieră de potențial Timpul necesar pentru finalizarea acestui proces este de " s Practic nu există nici un efect de acumulare a purtătorilor minoritari la baza diodelor tunel, deoarece acestea sunt utilizate la un nivel scăzut G Orez , Circuit echivalent al unei diode tunel tensiuni corespunzătoare secțiunii de cădere a caracteristicii I-V (cu rezistență diferențială negativă) Prin urmare, diodele tunel sunt capabile să funcționeze la frecvențe de până la sute de gigaherți, ceea ce corespunde intervalului milimetric al undelor radio Limita superioară a intervalului de frecvență de funcționare a diodelor tunel este limitată numai de reactanțe parazite - capacitatea proprie, care se bazează pe capacitatea de barieră a joncțiunii pn și inductanța terminalelor și a carcasei Pentru a analiza și a calcula parametrii care caracterizează proprietățile de frecvență ale diodelor tunel, folosim circuitul echivalent al unei diode tunel pentru un semnal AC mic în prezența unei tensiuni continue, care deplasează punctul de

operare către secțiunea de cădere a I-V caracteristică Circuitul echivalent al unui tunel dioda diferă de circuitul echivalent al unei diode convenționale doar prin aceea că aici, în locul rezistenței active a tranziției, se introduce o rezistență diferențială negativă r și se ia în considerare inductanța bornelor L (Fig) Impedanța diodei tunel la tensiune sinusoidală scăzută ¿ = r + J:ω L + g + /'oC ap = gb + g + f (? ap + + ~ g Whap) (a) unde g \u d /r - este conductivitatea diferențială negativă a diodei tunel Rezistența diferențială negativă a diodei tunel va exista dacă partea reală a rezistenței totale este mai mică decât zero, adică atunci când Γ grădină), atunci posibile fenomene de rezonanță nedorite apar numai la frecvențe la care dioda tunel nu va mai avea o rezistență diferențială negativă Transformăm inegalitatea ωo > ωχ, ținând cont de relațiile ( ) și ( ), astfel: L unde N este concentrația de impurități din bază Condițiile la limită pentru cazul în care curenții din tranzistor nu sunt foarte mari vor fi (Fig): la x \u d Pn = pnO( )exp^^ , tf=A ( ); (,) pentru x = w Pn = LP/(dvp) N = N(w) (,) Coordonatele x \u d și x \u d w corespund limitelor zonelor încărcăturii spațiale ale joncțiunilor emițătorului și colectorului (Fig) Datorită faptului că viteza de mișcare a purtătorilor de sarcină în regiunea joncțiunii colectorului vr este destul de mare, presupunem că la X= w Pп= Rezolvând ecuația ( ) în raport cu concentrația purtătorilor în baza tranzistorului, obținem w ( ) Pentru un tranzistor fără deriva A = const; deci Dp = const şi p"=-^(w - χï ( ) Astfel, distribuția purtătorilor de sarcină injectate de emițător în baza unui tranzistor fără derivă este liniară (Fig , b) Această concluzie este similară cu cea obținută mai devreme pentru dioda semiconductoare cu bază subțire (vezi §) și, ca și pentru dioda semiconductoare, este doar un caz limitativ Distribuția reală a purtătorilor în baza unui tranzistor fără derivă diferă de una liniară, deși doar puțin Pentru tranzistori, precum și pentru diodele semiconductoare, se poate găsi distribuția purtătorilor în emițător (ca într-o diodă cu conexiune directă) și colector (ca într-o diodă cu conexiune inversă), așa cum se arată în Fig b Pentru un tranzistor în derivă la o valoare constantă a intensității câmpului electric în bază (aceasta corespunde unei distribuții exponențiale a impurităților) fără a lua în considerare dependența lui Dp de N Distribuția corespunzătoare a concentrației de purtător este prezentată în Fig , c În acest caz, valoarea absolută a gradientului de concentrație a purtătorului crește pe măsură ce ne apropiem de joncțiunea colectorului La câmpuri electrice suficient de puternice în bază, gradientul de concentrație a purtătorului în apropierea emițătorului devine mic, adică curentul aici este predominant în derivă În apropierea colectorului, concentrația purtătorilor injectați scade, iar componenta de derivă a curentului scade și ea, dar componenta de difuzie crește; deci curentul total rămâne constant Cu o astfel de distribuție a impurităților, atunci când se creează o secțiune a câmpului de decelerare, se obține distribuția concentrației de purtător în bază, așa cum se arată în Fig , d Secțiunea câmpului electric de decelerare corespunde unei creșteri accentuate a concentrației purtătorilor și a gradientului acesteia la emițător Modul de saturație În modul de saturație, purtătorii de sarcină din regiunea de bază a tranzistorului se deplasează nu numai de la emițător la colector, ci și către ieșirea de bază Distribuția lor se schimbă, de asemenea, în consecință În acest caz, în partea pasivă a bazei este creată o concentrație semnificativă de purtători de sarcină minori În plus, o tensiune directă peste joncțiunea colectorului duce la injecția în regiunea colectorului A) Orez Distribuția purtătorilor

de sarcină minoritari în diferite regiuni ale tranzistorului în modul de saturație: a - în spațiu (schematic); b - într-un tranzistor fără deriva; c - într-un tranzistor de deriva Toate acestea fac imposibilă extinderea distribuției purtătorilor obținute anterior prin calcul la regimul de saturație Prin urmare, ne restrângem la caracteristicile calitative (Fig) Între emițător și colector, distribuția purtătorilor este determinată de raportul tensiunilor la joncțiunile pn și intensitatea câmpului electric din bază Pentru un tranzistor fără deriva, dacă tensiunea la joncțiunea colectorului este mai mică decât la joncțiunea emițătorului, concentrația purtătorilor de sarcină minoritari la colector este mai mică (Fig , b) Datorită recombinării în bază, legea distribuției nu este complet liniară Prezența unui câmp electric în baza tranzistorului de deriva contribuie la deplasarea purtătorilor de sarcină către colector În plus, în acest caz, concentrația de impurități din bază la colector este scăzută; în consecință, diferența de potențial de contact în joncțiunea colectorului este mai mică decât în joncțiunea emițătorului Prin urmare, chiar și la tensiuni directe mai mici la colector decât la emițător, concentrația de purtători în bază la joncțiunea colectorului poate fi mai mare decât la joncțiunea emițătorului (Fig , c) Distribuția purtătorilor în bază spre terminalul acesteia este determinată de injectarea purtătorilor minoritari prin joncțiuni pn și prin recombinarea purtătorilor atât în volum, cât și pe suprafața regiunii de bază Modul de tăiere În modul de tăiere, părțile tranzistorului adiacente joncțiunilor sale sunt puternic epuizate în purtătorii de sarcină minoritari § CURENTUL DC ÎN MOD ACTIV Distribuțiile concentrației purtătoarelor obținute în § fac posibilă scrierea expresiilor analitice pentru curenții continui într-un tranzistor care funcționează în modul activ Componenta principală a curentului din tranzistor - curentul purtătorilor de sarcină injectat de la emițător în bază, se găsește în funcție de distribuția purtătorilor în bază ( ) prin înlocuirea x = și a valorii concentrației corespunzătoare din ( )) În plus, pentru a trece de la densitatea de curent la curent, este necesar să se înmulțească expresia obținută cu aria emițătorului Oe Când calculăm, obținem /E,= expÆ (-) Pentru tranzistor fără deriva /Er~ s^P^Dp exp^L, ( ) care este aproape analogă cu expresia pentru curentul direct al unei diode semiconductoare cu bază subțire (vezi §) Pentru un tranzistor de deriva cu t = const și ¿)p = const /er " exp ( ) p -wi N(w) r kT K ' ~w) Compararea expresiilor obținute arată că pentru aceleași dimensiuni și tensiuni, curentul de emițător al tranzistorului de deriva este mai mare decât cel al celui fără derivă Pentru a determina curentul total al emițătorului, este necesar, în conformitate cu cele menționate în § , să se adauge la /Er componentele de curent asociate cu injectarea purtătorilor de la bază în emițător și recombinarea în joncțiunea pn a emiţătorul Ambele componente sunt calculate în același mod ca pentru o diodă semiconductoare (vezi § și): hn (exp >->) (,) (,) Curentul de bază datorat recombinării purtătorilor în volumul său și la suprafață poate fi găsit și din distribuția purtătorului Zona în care excesul de concentrație este pozitiv, adică unde are loc procesul de recombinare a purtătorilor, este situată între emițător și colector (Fig , a) De obicei, concentrația purtătorilor de sarcină injectați o depășește vizibil pe cea de echilibru în care (dp/df)væ ρη/τρ (,) După ce am integrat peste volumul regiunii în care se creează excesul de concentrație, obținem (,) Pe suprafața bazei, într-o bandă îngustă în jurul emițătorului, are loc recombinarea de suprafață a purtătorilor

de sarcină Numărul de purtători recombină pe unitate de timp pe unitate de suprafață este s(pn - pno)s (vezi §) Presupunând că în apropierea emițătorului, concentrația în exces de purtători minoritari pe suprafața de bază (Pn - pno)s " pn( )=pn (O) exp -^· (,) obținem pentru curentul de bază asociat cu recombinarea la suprafață, (,) Aici Srec este zona efectivă a benzii de-a lungul perimetrului emițătorului, unde are loc recombinarea purtătorilor injectați Pentru tranzistoarele fără derivă, putem presupune că lățimea acestei benzi este aproximativ egală cu grosimea regiunii pasive a bazei În modul activ, purtătorii de sarcină minoritari practic nu ating ieșirea de bază și putem presupune /peiskon = Componenta curentului colectorului IKr-Aer (^râuri I- ^rekh) (,) Curentul colectorului include și componente asociate cu generarea de purtători în volumul colectorului și în joncțiunea pn a colectorului Ele sunt definite aproape în același mod ca și pentru o diodă semiconductoare (vezi § și) Curentul asociat cu generarea în colector, /Kren = Zk^^ (,) Trebuie avut în vedere faptul că în regiunea colectorului acționează un câmp electric, asociat cu trecerea curentului purtătorilor principali de sarcină și dirijat în așa fel încât să contribuie la deplasarea purtătorilor minoritari către joncțiunea colectorului Sub influența acestui câmp, purtătorii de sarcină minoritari pot intra în joncțiunea colectorului nu numai din regiuni egale ca grosime cu Ln, ci și din regiuni mai îndepărtate Distanța pe care o parcurge un purtător de sarcină prin difuzie în timpul vieții sale este egală cu lungimea difuziei Dacă la difuzie se adaugă deriva, atunci această distanță crește la ¿η,Φ = Δη + μη£τ" = Δη(+-^-Δ") (,) În acest caz, intensitatea câmpului electric , (,) CHRRCHCR Apoi Δ"* = ' + Δ*^Ι~) apoi purtătorii de încărcare compensează complet încărcarea impurităților din partea colector a joncțiunii, iar joncțiunea colectorului pare să dispară În acest caz, funcționarea tranzistorului este întreruptă § PARAMETRI STATICI Parametrii statici ai unui tranzistor sunt valorile curenților sau tensiunilor măsurate în anumite condiții, precum și unele relații între aceste valori Opțiuni pentru modul Cutoff Valorile curenților emițătorului și colectorului sunt de obicei alese ca parametri statici care caracterizează modul de întrerupere Datorită faptului că în modul de tăiere există o anumită influență a unei tranziții a tranzistorului asupra altuia, acești curenți se găsesc în anumite condiții pentru pornirea tranzistorului Curenții inițiali de joncțiune sunt valorile curenților la tensiune inversă la orice joncțiune a tranzistorului, cu condiția ca tensiunea la cealaltă joncțiune să fie zero În practică, curenții inițiali se găsesc prin scurtcircuitarea ieșirii zonei corespunzătoare cu baza Deci, curentul inițial al colectorului /kbk * este determinat atunci când bornele emițătorului și bază sunt scurtcircuitate, iar curentul inițial al emițătorului /ebk este determinat când bornele colectorului și bază sunt scurtcircuitate Deoarece curenții inițiali de joncțiune ai unui tranzistor sunt de obicei destul de mici, un scurtcircuit al cablurilor corespunde unei tensiuni la joncțiune care este practic zero Conform definiției curenților inițiali, aceștia se găsesc la limita tranziției tranzistorului de la modul activ la modul de tăiere Să considerăm, de exemplu, originea curentului /KBk Când tensiunea la emițător este egală cu zero, doar componentele curentului emițătorului I$η și /erek merg la zero, în timp ce în conformitate cu ( ) la t/eB = O /er \u d F despre (,) Acest lucru se explică prin faptul că, atunci când se aplică tensiune la joncțiunea colectorului, purtătorii de sarcină minoritari sunt redistribuiți în bază, apare gradientul lor de concentrație și corespondentul * În indici, prima literă înseamnă

ieșirea în circuitul căreia se face măsurarea (E - emițător, K - colector, B - bază), a doua literă este ieșirea comună, a treia literă este modul de măsurare (K - scurtcircuit, O - circuit deschis) actual Curentul inițial al colectorului este suma curentului /Kp, de asemenea, nu este egal cu zero, și a curenților inverși ai joncțiunii colectorului La tensiuni nu foarte mari (M =) În mod similar, curentul inițial al emițătorului /Ebk- Curenții inverși ai joncțiunilor tranzistorului sunt înțeleși ca valorile curenților prin oricare dintre joncțiuni la o tensiune inversă, în timp ce curentul într-una dintre cele două terminale libere rămase este zero Astfel, curentul de colector invers al unui tranzistor dintr-un circuit cu o bază comună /Kbo este determinat la un curent de emițător egal cu zero, iar curentul de emițător invers pentru același circuit /ebo este determinat la un curent de colector egal cu zero În mod similar, puteți determina curentul de colector invers pentru un circuit cu un emițător comun /Keo (cu un curent de bază egal cu zero) Valoarea curentului /Kbo poate fi găsită din ( ), ținând cont de faptul că în acest caz nu există curent de emițător și, prin urmare, /Kp = Atunci ^CBO == (L>gena H- /kgen H- In) Ai (,) Înlocuind această expresie în ( ), obținem /k = MI^p -|- /kbo (,) Prin urmare, curentul /Kbo este componenta totală a curentului colectorului care nu este controlată de la emițător Curentul de bază / b - / râuri H- / rekh H- / rec kon + IEp + / erek / kr (M -) - / kbo (,) Și aici, /kbo este o componentă care nu depinde de curentul emițătorului Curentul emițătorului invers /Ebo- Opțiuni pentru modul activ Parametrii statici ai modului activ caracterizează în principal gradul de influență a circuitului de intrare al tranzistorului (emițător, bază) asupra ieșirii Acești parametri includ raportul de transfer al curentului static al bazei h l = ^-'p (,) "B'g" KBO Înlocuind expresiile obținute în §' pentru curenții de colector și de bază, obținem ^ E Ì a m dx^dx + + s,jv(o)JD" dx + N(O)Ln s υ" dx + (,) w A -ÈZ Çjy dx exp н- ÆÎ/eb λ a*d i PiT ¿/(srkon - í/eb) } Dp a exp V kT } a M ψ J Valoarea coeficientului de transfer de curent static al bazei este determinată de mai multe procese, care se reflectă în formula ( ) de factorii și termenii corespunzători Factorul a*, care ia în considerare modificarea curentului de colector invers cu o modificare a curentului emițătorului, este de obicei aproximativ egal cu unu Factorul de multiplicare a avalanșei A ține cont de efectul acestui proces asupra curentului total al colectorului termen (,) ia în considerare pierderea purtătorilor de sarcină din bază în timpul recombinării în vrac termen vorbește Z N e^( ) θ Pp (,) ia în considerare pierderile de purtători în bază datorită recombinării suprafeței termen Rp M)L((,) ia în considerare influența curentului purtătorilor de sarcină injectat de la bază în emițător termen W η,τ I^ke Caracteristici de ieșire Familia de caracteristici statice de ieșire ale unui tranzistor conectat conform unui circuit emițător comun este dată în fig , a Natura generală a acestor dependențe este similară cu natura ramurii inverse a caracteristicii I-V a diodei, deoarece cea mai mare parte a tensiunii sursei de alimentare a circuitului de ieșire scade la joncțiunea pn a colectorului, conectată în direcție opusă Cu toate acestea, spre deosebire de caracteristicile de ieșire ale unui circuit cu o bază comună, caracteristicile de ieșire ale unui circuit cu un emițător comun au o pantă mult mai mare, adică există o dependență mare a curentului colectorului de tensiunea colectorului Motivele acestui fenomen sunt ilustrate în Fig , b, care arată că odată cu creșterea tensiunii colectorului la un curent de bază constant, curentul emițătorului crește și, în consecință, crește curentul

colectorului Reamintim că componenta principală a curentului de bază (recombinare) este aproximativ proporțională cu numărul total de găuri din bază și, prin urmare, proporțională cu aria de sub curbele de distribuție a concentrației găurilor din bază Deplasarea în sus a caracteristicilor statice de ieșire are loc în conformitate cu formula ( ) și este asociată cu o creștere a curentului emițătorului, cu condiția ca tensiunea pe colector să fie constantă și curentul de bază să crească Este necesar să se noteze diferitele stând între caracteristicile de ieșire de-a lungul axei curentului la incremente egale ale curentului de bază La curenți de bază mici, curbele sunt aranjate frecvent, la curenți de bază mari, rar, și apoi din nou des Locația neuniformă a caracteristicilor este asociată cu o modificare a coeficientului de transfer DC de bază (/¿ ie) cu o modificare a curentului (vezi Fig) Într-un tranzistor conectat conform unui circuit cu un emițător comun, curentul / keo depășește curentul / Kbo pentru un circuit cu o bază comună (/ keo \u d \u d ț ~ Acest lucru se explică prin faptul că atunci când curentul de bază este zero și atunci când se aplică tensiune la colector, emițător (într-un circuit cu un emițător comun), joncțiunea p-n a emițătorului pornește sub o tensiune directă mică Prin urmare, curentul colectorului invers crește din cauza orificiilor injectate din emițător în bază Cu o tensiune a colectorului de zero, adică cu un scurtcircuit între colector și emițător și în prezența unui curent de bază, joncțiunea p-n a colectorului este pornită în direcția înainte, deoarece este în esență conectată în paralel cu emiţătorul de joncţiune p-n La /k = și /D = £ , din emițător sunt injectate găuri, ceea ce asigură că concentrația lor în apropierea colectorului în bază depășește valoarea de echilibru Dacă concentrația purtătorilor de sarcină minoritari în baza de lângă tranziția p-n o depășește pe cea de echilibru, atunci aceasta corespunde includerii directe a tranziției Astfel, tranzistorul funcționează în modul de saturație cu o tensiune de colector egală cu zero și chiar cu o tensiune mică de blocare pe colector în raport cu emițătorul Valoarea acestei tensiuni determină rezistența de saturație a tranzistorului (vezi §) Această tensiune este afectată de raportul căderilor de tensiune între joncțiunile emițătorului și colectorului, rezistența de volum a colectorului și rezistența de bază Pe rezistența de volum a colectorului, la trecerea curentului, se creează o cădere de tensiune, direcționată astfel încât să deschidă joncțiunea colectorului Prin urmare, tensiunea la ieșirea externă a colectorului, corespunzătoare ieșirii tranzistorului din modul de saturație, crește Curenții din baza tranzistorului sunt direcționați astfel încât căderea de tensiune pe care o creează blochează părțile joncțiunilor emițătorului și colectorului cele mai îndepărtate de terminalul de bază (vezi §) Ca urmare, chiar și atunci când partea de mijloc a joncțiunii colectorului este deja blocată, regiunile sale periferice rămân deschise și curentul trece prin ele către terminalul de bază (vezi Fig , a) Ca rezultat, curentul emițătorului este închis nu prin terminalul colector extern, ci prin regiunea colectorului și terminalul de bază Acest fenomen duce, de asemenea, la o creștere a tensiunii, la care tranzistorul iese din saturație Intervalul acestor valori ale tensiunii colectorului este cu atât mai mare, cu atât mai mult curent de bază În consecință, caracteristicile statice de ieșire ale tranzistorului într-un circuit cu un emițător comun la tensiuni joase pe colector și la /B#= intră în al patrulea cadran Când se modifică direcția curentului de intrare (bază), adică atunci când polaritatea tensiunii continue de pe bază se schimbă în raport cu emițătorul, valoarea curentului emițătorului

scade, ceea ce duce la o scădere a coeficientului de transfer al curentului emițătorului Prin urmare, coeficientul de transfer al curentului emițătorului va atinge unitatea la tensiuni ridicate ale colectorului, Defecțiune secundară l ! // i lș modul scurt Pentru a determina parametrii /¿, sunt necesare scurtcircuite în circuitul de ieșire și un mod inactiv în circuitul de intrare Sensul fizic al parametrilor /¿ este destul de simplu: /unsprezece i =o - rezistenta de intrare in cazul unui scurtcircuit al circuitului de iesire; R' = I/,= ή = τH/=o - coeficientul de feedback al tensiunii la ralanti în circuitul de intrare; - coeficientul de transfer de curent în cazul unui scurtcircuit al circuitului de ieșire; - conductivitate de ieșire la relanti în circuitul de intrare Avantajele parametrilor /¿ constau în comoditatea definiției lor experimentale În plus, parametrii / sunt măsurați în moduri apropiate de modurile de funcționare ale tranzistoarelor din circuitele practice Cu toate acestea, pentru calcularea circuitelor electrice, este adesea mai convenabil să folosiți alți parametri (de exemplu, ¿/) Trecerea de la un sistem de parametri la altul este destul de simplă În acest scop, ecuațiile sistemului din care se face tranziția trebuie rezolvate în raport cu mărimile care sunt funcții în sistemul la care se face tranziția Coeficienții obținuți la curenți sau tensiuni vor da formulele de tranziție De exemplu, dacă trebuie să vă mutați din sistem tema ¿/- parametrii la sistemul de z-parametri, ecuațiile ( ) trebuie rezolvate cu privire la u\ și (funcții în sistem ¿) Expresiile rezultate arată astfel: Da ^y (,) unde Áí/ = í/hí/ -U/ U/ este determinantul sistemului y Comparând sistemul ( ) cu ( ), obținem relații pentru trecerea de la un sistem de parametri la altul Formulele găsite într-un mod similar sunt rezumate în tabel Tabelul Formule de tranziție între sisteme de parametri \z\ \y\ \h\ ¿/ ¿/ Δλ/¿ Și Z\\ Δ, 'Δ,h /¿ У ¿/ /¿ - - ■ ■ ■' ■- ■ - D// /¿ /¿ /¿ ¿/ ¿/ d d "ïïTT/¿ ы ¿/ ¿/ /¿ DL d "dG /¿ /¿ Dz ¿/ /¿ /¿ IA| ¿/ ¿/и ¿/ Δ·,/¿ /¿ ¿/Hi/ Valorile parametrilor tranzistorului, prezentați sub forma unui cvadripol, depind de schema de includere a acestuia Cu toate acestea, dacă acești parametri sunt cunoscuți pentru orice schemă, este relativ ușor de recalculat pentru alta Pentru a face acest lucru, este necesar să înlocuiți tensiunile și curenții (având sub forma unei reguli de semne), având în vedere că în tranzistor Λ + Ib + Λ - ; (,) (ibe H- í k + ¿/ek = (,) După ce au făcut substituțiile necesare și am transformat ecuațiile, obținem formulele de tranziție ca coeficienți în ecuații De exemplu, ^ dacă parametrii ¿/- ai tranzistorului sunt cunoscuți pentru un circuit cu bază comună, dar este necesar să le găsiți pentru un circuit cu un emițător comun, în ecuații h = Y\Ib^eb + */ ^kb'> (,) /k = */ TUEb "H ^ ¿^K (,) înlocuim curenții și tensiunile folosind expresiile ( ) și ( ) După transformări, obținem L - (*/ + U/ + U/ + # b) Obe - (Ui b H- # b)^ke, (,) A = -(*/ + i/)^be + i/ ^ke, (,) unde Sibe = - t/eb Prin urmare, U\\ - Y\\b + */ + */ + U b\ Ui e \u d - (U \ b + U / &); Y e \u d - (Y b + * / b) i (-) U e \u d U Relațiile pentru alți parametri sunt derivate în mod similar § CIRCUIT ECHIVALENT Considerarea unui tranzistor ca o rețea liniară activă cu patru terminale (vezi §) este convenabilă pentru calcularea circuitelor electrice Cu toate acestea, are și o serie de dezavantaje, care sunt legate în primul rând de faptul că parametrii cvadripolului sunt introduși formal într-o anumită măsură și fiecare dintre ei poate reflecta influența mai multor procese fizice simultan Prin urmare, se obțin dependențe complexe ale parametrilor cvadripolului de modul de funcționare al tranzistorului (tensiuni și curenți constante), de

frecvență și temperatură Pentru a simplifica aceste dependențe, proprietățile unui tranzistor cu un semnal variabil mic sunt descrise folosind circuite echivalente Prin circuit echivalent se înțelege un circuit electric compus din elemente liniare ale circuitelor electrice (rezistențe, capacități, inductanțe, generatoare de curent sau de tensiune), care în proprietățile sale pentru un semnal dat (de exemplu, pentru o variabilă mică) nu diferă dintr-un obiect real (tranzistor) Reprezentarea grafică a circuitelor echivalente face posibilă fixarea relațiilor principale mai economic Când calculați folosind circuite echivalente, mai întâi determinați curenții și tensiunile din circuitul însuși și apoi treceți la alți parametri, de exemplu, parametrii unui cvadripol Niciun circuit echivalent al unui număr finit de elemente nu poate fi complet echivalent cu un tranzistor real, adică toate circuitele echivalente se dovedesc a fi aproximative Cu cât circuitul echivalent este mai simplu, cu atât conține mai puține elemente polițiști, cu atât este mai ușor de utilizat, dar, de obicei, reflectă mai puțin precis proprietățile unui tranzistor real După metoda de construcție, se disting circuitele echivalente formale și fizice Circuitele echivalente formale sunt construite pe baza descrierii tranzistorului folosind ecuațiile cvadripolare (Fig) După cum se poate observa din figură, fiecare circuit conține patru elemente: două rezistențe (complexe) și două generatoare de curent sau tensiune Astfel de circuite echivalente nu au niciun avantaj față de a descrie tranzistorul ca fiind patru Orez Circuite formale echivalente de tranzistori: a - pentru sistemul de parametri z; b - pentru sistemul de ¿/-parametri; c - pentru sistemul /¿-parametru Orez Circuite echivalente formale cu un singur generator: a - circuit echivalent în formă de T cu un generator EMF; b - circuit echivalent în formă de T cu generator de curent; c - Circuit echivalent în formă de U cu un generator de curent rehpole prin setarea parametrilor acestuia (sau ecuațiile corespunzătoare) Circuitele echivalente formale pot fi reprezentate sub diferite forme: de exemplu, pot fi construite astfel încât să existe un singur element activ în circuit (Fig) De obicei, aceste scheme sunt împărțite în formă de T și U conform metodei de desen Pentru a stabili legătura dintre elementele circuitelor formale cu un singur generator și parametrii unui cvadripol, se pot scrie expresii pentru curenți și tensiuni în ele, apoi le pot compara cu valorile curenților și tensiunilor unui cvadripol De exemplu, pentru un circuit echivalent în formă de T cu un generator EMF (Fig , a) în modul inactiv la ieșire ù = (Z " Z), | $ = Ùm "H A^ , I (,) în regim de repaus la admisie Și ' ¡ Z '!( ) U = / (r + r) J - De aici Ù I ,, , Úm , í>ι I " , - I/ =o - Z + ~Г~ ' ~Г / = = + Z = "' (,) -TT-!, = з = Zl ; ~j - I = Z + = Z) h '/ι=o / '/ι= După transformare, obținem valorile prezentate în figură Parametrii altor circuite cu un singur generator se obțin în mod similar Circuitele echivalente fizice se bazează pe considerații fizice pentru anumite tipuri de modele de tranzistori, pentru un anumit domeniu de frecvență, concentrându-se pe un anumit circuit de comutare a tranzistorului (cu un emițător comun, o bază comună, un colector comun) Fiecare pin al circuitului echivalent fizic corespunde unui electrod al tranzistorului Rețineți că în circuitele echivalente formale, se disting numai bornele de intrare și de ieșire, indiferent de electrozi de tranzistor Un circuit echivalent fizic este construit prin evidențierea mentală a unor părți dintr-un tranzistor și luând în considerare separat procesele din aceste părți Construcția se bazează de obicei pe circuitul echivalent formal al unui tranzistor idealizat, numit model teoretic unidimensional Când se studiază un

model teoretic unidimensional al unui tranzistor, se consideră că purtătorii de sarcină din acesta se deplasează pe căi paralele, iar recombinarea suprafeței modifică doar durata de viață a purtătorilor În plus, modelul teoretic unidimensional nu ține cont de influența rezistențelor de volum și a curenților care trec prin capacitățile de barieră ale joncțiunilor În astfel de ipoteze, se dovedește că parametrii unui circuit echivalent formal pot fi exprimați pur și simplu în termeni de parametrii de proiectare ai unui tranzistor idealizat (grosimea bazei), modul său de funcționare și proprietățile materialului La modelul teoretic unidimensional al tranzistorului se adaugă elemente care iau în considerare alte procese, de exemplu, căderile de tensiune pe rezistențele în vrac, curenții prin capacități etc § SCHEMA ECHIVALENTĂ A UNUI MODEL TEORETIC UNIDIMENSIONAL După cum sa menționat, parametrii unui circuit echivalent formal pot fi exprimați cu ușurință în ceea ce privește parametrii unui cvadripol, care, la rândul lor, pot fi găsiți din valorile curenților și tensiunilor din tranzistor Prin urmare, pentru a construi un circuit echivalent formal al unui model teoretic unidimensional al unui tranzistor, este necesar să se cunoască componentele variabile ale curenților și tensiunilor Un calcul riguros al acestor componente este efectuat în aproape același mod ca și calculul componentelor constante (vezi §) Cu toate acestea, este mai complicat, deoarece în acest caz presupunerea unei densități constante de curent în toate secțiunile bazei este mai puțin justificată, acest lucru este pronunțat în special în regiunea de înaltă frecvență Pentru calcule suplimentare, folosim o metodă simplificată Având în vedere că toți parametrii circuitului echivalent formal sunt complexi, îi vom prezenta ca rezultat al unei conexiuni paralele a rezistențelor și capacităților Circuitul echivalent rezultat este prezentat în fig Acest circuit echivalent ar trebui să fie valabil în regiunea de joasă frecvență Apoi, rezistențele active ale circuitului echivalent pot fi obținute ca raport dintre creșterile de tensiune din circuitele tranzistorului și creșterile de curent care le-au provocat (astfel de creșteri joacă rolul de semnale variabile la frecvențe joase) Conform circuitului echivalent, rezistența emițătorului r du Q I du Q I E di ■ /K=COIlst diK Ií =const' Orez Circuit echivalent al unui model teoretic unidimensional al unui tranzistor: a - cu rezistenţe complexe; b - cu rezistenţe active şi capacităţi de difuzie (,) GB rezistența colectorului eu diK h =const' (,) rezistenta la difuzie du Q I dif ~G , > dlK lí =const bazele (,) coeficientul de transfer al curentului de emițător al unui model teoretic unidimensional al unui tranzistor diK di UK =CONst * (,) Capacitatele din circuitul echivalent al modelului teoretic unidimensional reflectă doar acumularea de purtători de sarcină în bază Capacitate de difuzie ale tranzistorului = ^- ;(,) sedif "Ch '/K=const'i =const C dnf = -^-| ;(,) iie 'í =const Z duKQ du Q \ I/, \ Diferența de viteză X dQ dQ / 'z =const Valabilitatea relațiilor ( ) - ( ) se păstrează până la frecvențe, când perioada semnalului începe să se apropie de timpul de zbor al purtătorilor de sarcină prin bază Să luăm în considerare ce procese pe baza unui model teoretic unidimensional al unui tranzistor determină valorile parametrilor circuitului său echivalent Generatorul de curent din circuitul colector ia în considerare, așa cum este indicat, proprietatea activă a tranzistorului Valoarea curentului acestui generator este proporțională cu valoarea curentului emițătorului și depinde de frecvență În acest caz, atât amplitudinea, cât și faza curentului se modifică Dependențele de frecvență ale lui a sunt considerate în detaliu în § , aici ne

limităm la studierea valorii sale de joasă frecvență a Folosind expresiile pentru curenții de tranzistor (vezi §), folosind formula ( ), puteți găsi valoarea lui a Pentru a ști ce procese determină valoarea lui a, acesta este reprezentat ca un produs al patru factori: α = γαπα*Λ , (,) unde γ = -^-| t este randamentul emițătorului, indicând care este proporția purtătorilor de sarcină injectați în bază în curentul total al emițătorului (valoarea lui γ este de obicei puțin mai mică decât unitatea); \u d - coeficientul de transfer care arată cum ¿♦¿er I uK =const o parte din purtătorii de sarcină injectați în bază ajunge la joncțiunea colectorului (valoarea lui an este de obicei puțin mai mică unității; \ u d - eficiența colectorului, până la - dlKp 'UK =CONst M= care determină de câte ori crește curentul colectorului datorită prezenței unei componente în curentul invers al joncțiunii colectorului care depinde de curentul emițătorului (valoarea unui * este de obicei puțin mai mare decât unu sau egală cu unu); M este factorul de multiplicare a avalanșei (vezi §) Eficiența colectorului a* ține cont de fenomenul asociat cu o modificare a extragerii purtătorilor minoritari din regiunea colectorului: cu creșterea curentului emițătorului și, în consecință, a curentului colectorului, scăderea tensiunii în vrac rezistența regiunii colectoare, care promovează deplasarea purtătorilor minoritari ai regiunii colectoare către joncțiunea colectorului Ca rezultat, pe măsură ce curentul emițătorului crește, curentul colectorului crește nu numai datorită trecerii purtătorilor injectați de emițător prin joncțiunea colectorului, ci și datorită extragerii purtătorilor de sarcină minoritari din părți mai îndepărtate ale regiunii colectoare În practică, a* >> numai în tranzistoarele cu germaniu cu o regiune colectoare de înaltă rezistență La tranzistoarele de siliciu, α *" , deoarece curentul invers prin joncțiunea p-n de siliciu se datorează în principal generării termice a purtătorilor în joncțiunea p-n însăși, și nu extracției purtătorilor de sarcină minoritari Relațiile generale derivate mai devreme ne permit să obținem toți factorii ( ) - parametrii interni ai tranzistorului Pentru tranzistor fără deriva γ " ! - ;(,) RpobVr^n a" ~ ~ (-) ci* " (,) Parametrul a este asociat cu coeficientul de transfer de curent al bazei modelului teoretic unidimensional al tranzistorului β \u d M "-M - (,) Shb 'wK =const - a Egalitatea ( ) este aproximativă, deoarece determinarea coeficienților de transfer ai curentului emițătorului a și curentului de bază β se realizează în condiții oarecum diferite: ízK =const și ike = const Parametrii circuitului echivalent al unui model teoretic unidimensional al unui tranzistor a și β pot fi exprimați cu ușurință în termeni de parametrii unei rețele echivalente cu patru terminale, adică în termeni de parametrii unui tranzistor real: aæ -/i ib; (,) β ~ ^ ie (,) Aceste egalități sunt, de asemenea, aproximative, deoarece se fac o serie de ipoteze pentru modelul teoretic unidimensional al tranzistorului (vezi §) Semnele coeficienților de transfer al curentului emițătorului ai unui model teoretic unidimensional al unui tranzistor și al unui tranzistor real ( ) sunt diferite datorită diferenței de direcții ale curenților într-un tranzistor real conectat conform unui circuit de bază comun și direcții acceptate convențional ale acelorași curenți într-o rețea echivalentă cu patru terminale rezistența emițătorului Dacă γ= , atunci rezistența emițătorului (,) Pentru un tranzistor fără deriva, folosind relațiile din § , obținem = kT ~ qh' (,) Pentru un tranzistor de deriva cu un câmp constant în regiunea de bază kT qh MO) / M^)\ N(w) VMO) MO) kT ql ' (,) Astfel, rezistența emițătorului unui tranzistor fără deriva este aproximativ

jumătate din cea a unui tranzistor cu deriva Acest lucru se datorează faptului că rezistența emițătorului în tranzistoarele fără derivă reflectă nu numai modificarea curentului emițătorului cu o modificare a tensiunii, ci ia în considerare și efectul de modulare a grosimii bazei În tranzistoarele cu deriva, curentul emițătorului este determinat în mare măsură de câmpul electric; prin urmare, rolul de modulare a grosimii bazei este mai mic în acest caz Capacitatea de difuzie a emițătorului În mod similar, capacitatea de difuzie a emițătorului se găsește: r ~ iѢ-i '-'E dif *prol· (,) Rezistența la difuzie a bazei Calculul da βZ-e, (,) Pentru tranzistor fără deriva G b dif kT L q/e w (,) pentru deriva ln jy(L¿ kT N(w)~kT L N(w) Λ/(θ) GB diff ql~¡V( ) ŢŢN(w) V ^Ge w* MO) IΠ N(w) N(w) WV Mθ) / (,) Rezultatele obţinute arată că pentru tranzistoarele cu deriva rezistenţa la difuzie a bazei este mai mică decât pentru fără deriva Acest lucru se datorează și faptului că efectul modulației grosimii bazei asupra curentului emițătorului în tranzistoarele cu deriva este neglijabil Capacitatea de difuzie a bazei Prin analogie cu definiția capacității de difuzie a emițătorului, w W kT i N i D" aX- Pentru tranzistor fără deriva g qls W bdiff - ^b diff pentru deriva r ~ ql w ΎҮ( ) b d "F ~ kT D" N(w) N(ΰ) N(w) (,) (,) (,) Capacitatea de difuzie a bazei tranzistorului de deriva s-a dovedit a fi destul de mare, ceea ce reflectă un feedback mic între circuitele colector și emițător datorită influenței mici a modulării grosimii bazei rezistența colectorului Pe baza expresiilor pentru curenți, obținem valorile rezistențelor colectorului tranzistorului fără derivă L fK ■-■■■ rdw I w - duK (,) și tranzistor de deriva L ^ N(w) K j dw ¡ w-duK (,) Aceste rapoarte pot fi convertite folosind expresia pentru grosimea joncțiunii colectorului Tranzistoarele fără deriva folosesc de obicei joncțiuni p-n ascuțite În acest caz dw duK dàK δκ duK (,) ȘI r Гκ -¡eG Dacă presupunem că joncțiunea colector a tranzistorului de deriva este netedă cu o distribuție liniară a concentrației de impurități, atunci (,) dw δκ duKQ ¿ ke ȘI 3I Kpш Gk l" Din expresiile obținute, rezultă că rezistența colectorului unui tranzistor cu deriva este mai mare decât cea a unui tranzistor fără derivă, atât din cauza efectului mai mic al modulării grosimii bazei asupra curentului colector, cât și din cauza dependenței mai slabe de tensiune a grosimea regiunii de încărcare a volumului pentru tranziții netede Capacitatea de difuzie a colectorului Acest parametru de circuit echivalent este definit în mod similar cu cei anteriori: W g J N(w) 3 dx dw Pentru tranzistor fără deriva skdif-' pentru deriva r> l ÒKw kdiff U^D" N( ) ' N(w) ( ) (,) (,) , USD CAPACITAȚII DE BARIERĂ ALE JONCȚIUNILOR ȘI REZISTENTĂ DE BAZĂ Determinarea capacităților de barieră ale joncțiunilor tranzistorului nu este, în principiu, diferită de calculele date în § Când se calculează capacitatea de barieră a unui colector, se poate neglija adesea diferența de potențial de contact, având în vedere că tensiunea de curent continuu la nivelul colectorului este destul de mare Calculul capacității de barieră a emițătorului are unele particularități În primul rând, este necesar să se țină cont de diferența de potențial de contact, deoarece tensiunea la emițător este directă În plus, circuitul emițătorului primește adesea curent (vezi §) mai degrabă decât tensiune Acest lucru se datorează rezistenței scăzute de intrare a tranzistorului Prin urmare, tensiunea din formula pentru capacitatea barieră este, de asemenea, mai bine exprimată în termeni de curent emițător De exemplu, pentru un tranzistor fără deriva cu o joncțiune a emițătorului ascuțită ^e bar (fcon - ^Eb) (,) Diferența de potențial de contact de la ( ) Eu sunt Pi Tensiunea emițătorului de la ( ) IÍ kT

In EB - Π -ρ I ÇPnQl-^p^e (,) (,) Înlocuind aceste expresii în ( ), obținem Se bar - ip i#r$e (,) /ESH Baza tranzistorului are, după cum sa menționat, rezistență; prin urmare, curenții care trec prin el pot crea mai departe Orez Traseele curenților în baza tranzistoarelor (schematic): a - aliaj; b - plană această rezistență la căderile de tensiune care sunt aplicate joncțiunilor tranzistorului, creând feedback-uri În plus, rezistența de bază în sine determină valoarea constantelor de timp de încărcare ale capacităților de barieră ale joncțiunilor Prin urmare, pentru a determina rolul rezistenței bazei și locul acesteia în circuitul echivalent al unui tranzistor, luăm în considerare distribuția curenților în bază Natura acestei distribuții depinde în mare măsură de proiectarea tranzistorului (Fig) Curenții din regiunea de bază a tranzistorului pot fi împărțiți în următoarele:) componenta constantă a curentului de bază asociată recombinării, cu injectarea purtătorilor de sarcină de la bază în emițător și parțial cu înmulțirea în avalanșă a acelor purtători care merg de la emițător la colector, /bi^/e/^ie; (,) calea acestei componente curente merge de la partea activă a bazei la ieșirea de bază;) componenta variabilă a curentului de bază, asociată cu aceleași procese ca și componenta constantă, precum și cu acumularea de sarcină în bază, /b "/e//g ,; ( ) calea acestei componente curente este aceeași cu prima;) componenta variabilă a curentului de bază asociată cu sarcina capacității de barieră a emițătorului, /b = /(ySe bar^ebi ( ) această componentă a curentului merge aproape în același mod ca primele două;) curent invers al colectorului ^b = /kbo; ( ) această componentă a curentului de bază merge de la joncțiunea colectorului la borna de bază;) curentul de încărcare al capacității barierei colectorului -/^Sq bar kb, (,) acest curent parcurge o cale aproximativ aceeași cu curentul de colector invers Influența acestor curenți asupra funcționării tranzistorului este diferită Componentele constante duc la o schimbare a punctelor de funcționare și o redistribuire a densității curentului pe zona emițătorului În plus, trebuie luat în considerare faptul că rezistența prin care trec curenții continui este modulată - sub acțiunea unei tensiuni alternante a colectorului, lățimea regiunii de încărcare spațială a joncțiunii colectorului se modifică, ceea ce duce la o modificare a grosimii a bazei, Z adică secțiunea transversală prin care trec curenții continui Trecerea curenților continui printr-o rezistență variabilă duce la manifestarea unei tensiuni alternative, care se aplică joncțiunilor p-n ale tranzistorului, ducând la apariția feedback-ului Componentele variabile ale curenților, care trec prin rezistența de bază, provoacă apariția unor tensiuni alternative, care duc și la apariția feedback-ului în tranzistor Astfel de feedback-uri sunt formate diferit în funcție de designul tranzistorului Astfel, în proiectarea prezentată în fig , a, se aplică joncțiunii emițătorului o cădere de tensiune, cauzată de întregul curent de încărcare al capacității barierei colectorului Cu un alt design (Fig , b), numai curentul care curge din partea colectorului adiacent părților active și pasive ale bazei creează o cădere de tensiune care afectează diferența de potențial dintre emițător și bază Curentul care curge prin partea periferică a bazei nu creează un astfel de feedback Pe lângă crearea de feedback în tranzistor, componentele de curent alternativ oferă o modificare a sarcinilor barierei capacități, astfel încât rezistențele corespunzătoare determină constantele de timp Caracteristici ale calculului rezistenței de bază:) întrucât sunt rezistențe distribuite ale unor zone de volum, este necesar să se țină cont de creștere fluxul de curent;) în legătură cu natura distribuită a rezistenței bazei, ar

trebui să se țină cont de un efect mediu produs de astfel de rezistenţă În plus, la tranzistoarele cu o distribuție neuniformă a impurităților în bază, trebuie să se țină seama și de faptul că rezistența specifică Orez Structura tranzistorului adoptată pentru a calcula rezistența de bază tensiunea este diferită în puncte diferite Cu toate acestea, baza unui tranzistor este de obicei un strat foarte subțire, iar curentul de bază curge aproape exclusiv de-a lungul acestui strat Apoi, în locul rezistivității obișnuite, se poate introduce rezistența secțiunii pătrate a stratului (h W q{pNdx\ ( ) Qs similar în sens cu specific rezistenta la suprafata Să calculăm coeficientul de feedback între lanț mi a colectorului și emițătorului tranzistorului, a cărui structură este prezentată în fig Densitatea curentului capacitiv al colectorului /k = /U-^rDb ( ) Un curent cu o asemenea densitate este injectat în bază Lăsați în zona de la la xe rezistența pătratului stratului de bază psi Apoi căderea de tensiune în secțiunea dx dû = -I-^Ţ-dx ( ) Vom presupune că tensiunile care apar în bază sunt mici, astfel încât curentul tras de la bază prin joncțiunea emițătorului este de asemenea mic Atunci curentul care trece prin secțiunea dx este Ì = xlJK Integrând ( ), pe secțiunea de la xe la x obținem ύ - ux, = jK-^(x -x) ( ) În mod similar, găsim distribuția tensiunii în secțiunea DE LA Xe LA Xb' u = ;k-^(-X Y, (,) Unde íΛ, = Λ -> Xxb - Xe) ( ) Apoi pe tronsonul de la la el u=^[qs (x -x)+ρί (χβ - x,)] ( ) Astfel, tensiunea din bază este distribuită neuniform Pentru a determina valoarea medie a tensiunii care creează feedback, luăm în considerare că în acest caz curentul emițătorului trebuie să fie egal cu zero, adică $((eb - í)dx = ( ) O Apoi Veb = (χ - x)dx + Qs -y-(^ - Xe) ( ) Orez Circuite echivalente complete de tranzistoare: a - aliate (Fig , a); b - plan (Fig ,) În cele din urmă, înlocuind valoarea /k, obținem + Qs Xb ~^~) == bar , ( ) de unde rezistența efectivă care determină feedback-ul, r' = + e^ ?x) ■(,) Rezistența de bază este determinată în mod similar pentru alte conexiuni din tranzistor Metoda de calcul trebuie aleasă în funcție de procesul studiat Luați în considerare construcția de circuite echivalente complete de tranzistoare (Fig) Pentru un tranzistor fără deriva cu structura prezentată în fig , a, circuitul are forma prezentată în fig a Elemente corespunzătoare unui model teoretic unidimensional, Orez Dependențe ale parametrilor circuitului echivalent al tranzistorului de curentul constant al emițătorului (a) și de tensiunea constantă pe colector (b) nu diferă de cele prezentate în fig Pe lângă rezistențe, circuitul de bază include un generator EMF care ține cont de tensiunea care apare în bază atunci când un curent continuu trece printr-o rezistență variabilă Pentru un tranzistor de deriva cu structura prezentată în Fig , b, circuitul echivalent este oarecum diferit Capacitatea de barieră a colectorului în acest caz este reîncărcată prin diferite rezistențe O parte din această capacitate C'k bar creează feedback, iar o parte din capacitatea colectorului C "bar, corespunzătoare bazei periferice, nu oferă feedback În plus, datorită frecvențelor de operare înalte la care funcționează tranzistoarele de deriva, este este indicat să se țină cont în circuitul echivalent de capacitatea dintre bornele externe Ske, Sab, SKb, precum și rezistența de volum a colectorului Modul de funcționare al tranzistorului (tensiunea colectorului, curentul emițătorului) afectează semnificativ parametrii echivalentului sistem Aceste dependențe sunt explicate prin relațiile date în § , și Pe fig arată dependențele parametrilor unui tranzistor cu germaniu fără deriva de putere mică de curentul emițătorului (Fig , a) și de tensiunea colectorului (Fig) Pentru claritate, toate dependențele sunt date ca

fiind relative - valorile parametrilor la /e= mA și t kb = V sunt luate ca unitate Orez Dependența parametrilor /ι ai tranzistorului de curentul constant al emițătorului (a) și de tensiunea constantă pe colector (b) Orez Dependențe ale parametrilor circuitului fizic echivalent al tranzistorului de temperatură Orez Dependențe/i-parametri ai tranzistorului de temperatură Pe fig arată dependențele normalizate ale parametrilor /¿ ai unui cvadripol, echivalent cu un tranzistor cu germaniu de putere mică, fără deriva, de modul de funcționare Tranzistoarele, ca și alte dispozitive semiconductoare, își schimbă proprietățile atunci când temperatura se schimbă, ceea ce în unele cazuri îngreunează aplicarea lor Pe fig arată dependențele parametrilor circuitului echivalent al unui tranzistor cu germaniu fără deriva de putere mică de temperatură (modificări relative ale valorilor) Pe fig arată dependența de temperatură a parametrilor cvadripolului § CARACTERISTICI DE FRECVENTA Unul dintre principalii factori care determină adecvarea unui tranzistor pentru utilizarea într-un anumit circuit electric este dependența parametrilor săi de frecvență Dependența proprietăților de amplificare ale tranzistorului de frecvență sunt de o importanță deosebită Să luăm în considerare dependența de frecvență a coeficientului de transfer al curentului emițătorului /r ib În § s-a remarcat că coeficientul de transfer al curentului este afectat de capacitatea circuitului emițătorului, timpul de zbor al purtătorilor de sarcină prin bază, timpul de zborul purtătorilor prin regiunea încărcăturii de volum a colectorului și constanta de timp circuite colectoare Constanta de timp a circuitului emițător După cum se precizează în § , circuitul emițător al unui tranzistor poate fi p), ( ) pentru deriva d- - ío = ^^-=í?Spmüp, ( ) adică δ = a și la alte frecvențe /=M^sin^cos(wz-w) L e ω I ^ și I ( ) ω Astfel, frecvența limită ωΓρ a coeficientului de transfer al curentului de bază este frecvența la care modulul coeficientului de transfer al curentului de bază devine egal cu unu Din relația ( ) rezultă că la frecvențe care depășesc frecvența limită a coeficientului de transfer de curent al bazei shl ie, modulul coeficientului de transfer al curentului de bază este invers proporțional cu frecvența Prin urmare, pentru a determina experimental frecvența limită a coeficientului de transfer al curentului de bază ωΓρ, este suficient să se măsoare modulul coeficientului de transfer al curentului de bază h ! "din" LA? h of' LA Shgr Uh Orez Dependențe ale modulelor coeficienților de transmisie de frecvență (scara logaritmică) frecvența ω>>ω/ι ἶ și mai departe ( )Gr - I^ e Ï Û) ( ) Grafic, dependența coeficienților de transmisie de frecvență este prezentată în fig Din grafic se poate observa că |й ie| scade la frecvențe mult mai mici decât |/r ib| Din punct de vedere fizic, acest lucru se datorează influenței defazajului dintre curenții emițătorului și colectorului (Fig) Odată cu creșterea frecvenței, defazarea crește, iar acest lucru duce la o creștere a curentului de bază, chiar dacă curentul curentul colectorului și al emițătorului sunt constante în valoare absolută Prin urmare, și II EI \ u d W ( ) scade Câștig de putere la frecvențe înalte Pe măsură ce frecvența semnalului crește, câștigul de putere al tranzistorului scade Acest lucru se datorează atât scăderii câștigului de curent, considerată mai devreme, cât și efectului circuitului r'bSk,bar Orez Diagrame vectoriale ale curenților de tranzistori la diferite frecvențe Orez Circuitul colector al tranzistorului (pentru componenta de curent variabil) Odată cu creșterea frecvenței, efectul de manevră al acestui circuit asupra sarcinii crește, un curent mai mic se ramifică în sarcină, ceea ce duce la o scădere a câștigului de putere (Fig) Pentru

a combate acest fenomen, trebuie aleasă o anumită rezistență la sarcină, adică sarcina trebuie să fie potrivită Totuşi, la frecvenţe foarte înalte şi acest lucru face imposibilă obținerea unui câștig suficient de putere La o anumită frecvență, câștigul de putere al tranzistorului chiar și cu o sarcină potrivită devine egal cu unu Aceasta înseamnă că un tranzistor la o astfel de frecvență nu mai poate fi considerat un element activ al electricității sistem Cu un câștig de putere egal cu (sau mai mic decât) unitate, este imposibil să implementați un mod de autoexcitare într-un generator de tranzistori Prin urmare, frecvența la care câștigul de putere devine egal cu unitatea se numește frecvența maximă de generare Calculul arată că frecvența maximă de generare poate fi găsită prin formula II b/gr l GB Sk bar ( ) Frecvența maximă de generare caracterizează cu cel mai mare succes proprietățile de frecvență ale tranzistorului, deoarece determină domeniul de frecvență în care tranzistorul rămâne un element activ al circuitului electric § FUNCȚIONAREA TRANZISTORULUI PE PULSURI Caracteristicile muncii Tranzistorii sunt adesea folosiți în dispozitivele cu impulsuri și ca comutator de tranzistori Atunci când un tranzistor este utilizat în dispozitive cu impulsuri, de obicei este necesar să se reproducă nedistorsionat impulsul amplificat la ieșire Funcționarea unui tranzistor la amplificarea semnalelor pulsate mici nu este în principiu diferită de funcționarea unui tranzistor la amplificarea semnalelor sinusoidale mici Pulsul poate fi reprezentat ca o sumă a unui număr de componente armonice și, cunoscând proprietățile de frecvență ale tranzistorului, determină distorsiunea formei impulsului care poate apărea în timpul amplificării Funcționarea tranzistorului la amplificarea semnalelor de impuls mari este diferită prin aceea că, în acest caz, tranzistorul poate fi nu numai în modul activ, ci și în modurile de tăiere și saturație Când un tranzistor funcționează ca un comutator de tranzistor, este necesar ca rezistența tranzistorului la ieșire, adică în circuitul de sarcină, să se modifice brusc sub influența impulsului de control de intrare Pentru a face acest lucru, amplitudinea impulsurilor de intrare trebuie să fie suficientă pentru a transfera tranzistorul din modul de tăiere în modul activ de funcționare și apoi în modul de saturație, precum și în direcția opusă Circuit de bază comun Să luăm în considerare procesele care au loc într-un tranzistor conectat conform unui circuit de bază comun atunci când un impuls de curent de durată /imp trece prin emițător în direcția înainte, urmată de o schimbare a direcției sale spre opus (Fig) În starea inițială, tranzistorul este în modul de întrerupere, adică joncțiunile emițătorului și colectorului sunt polarizate invers După aplicarea unui impuls de curent prin emițător în direcția înainte, curentul colectorului nu apare imediat, deoarece este nevoie de ceva timp pentru a reîncărca capacitățile de barieră ale joncțiunilor emițătorului și colectorului, precum și pentru a muta purtătorii de sarcină minoritari injectați la tranziția colectorului accident vascular cerebral (Fig) Intervalul de timp dintre momentul în care un impuls de curent este aplicat la intrarea tranzistorului și momentul în care curentul de ieșire atinge o valoare corespunzătoare cu % din amplitudinea sa se numește timp de întârziere pentru un tranzistor biopolar /zd În viitor, procesul de reîncărcare a capacității de barieră a joncțiunii emițătorului continuă, ceea ce duce la o creștere a tensiunii la joncțiunea emițătorului, la o creștere a concentrației limită și a gradientului de concentrație al purtătorilor de sarcină minoritari în baza de lângă emițător joncțiune (Fig , c) O creștere a gradientului de concentrație al purtătorilor de sarcină

minoritari în apropierea joncțiunii emițătorului corespunde unei creșteri a injecției $) / ¿ eche o / ϋ d) y Orez Dependențe de timp ale curentului emițătorului (a) și curentului colectorului (b) atunci când tranzistorul funcționează ca o cheie în conformitate cu circuitul de bază comun și distribuția purtătorilor de sarcină minoritari în bază la momente diferite (c, d) ale curentului emițătorului componentă Componenta capacitivă a curentului emițătorului scade pe măsură ce capacitatea de barieră a joncțiunii emițătorului este încărcată, astfel încât curentul total al emițătorului / ei rămâne neschimbat (Fig , a) Valoarea sa este determinată de parametrii generatorului de curent din circuitul de intrare al tranzistorului Datorită creșterii componentei de injecție a curentului emițătorului, are loc procesul de acumulare a purtătorilor de sarcină minori în baza tranzistorului De asemenea, acest proces nu are loc instantaneu, deoarece viteza de mișcare a purtătorilor de sarcină minoritari în bază este finită În procesul de acumulare a purtătorilor de sarcină minoritari, gradientul concentrației lor în apropierea joncțiunii colectorului crește, ceea ce corespunde unei creșteri a curentului colectorului Pentru valori mari ale curentului emițătorului /ei, curentul colectorului este limitat nu de curentul emițătorului, ci de parametrii circuitului colectorului de ieșire Emițătorul injectează în bază atât de mulți purtători de sarcină minori încât joncțiunea colectorului nu poate extrage controlul la o valoare dată a rezistenței de sarcină și EMF a sursei de alimentare din circuitul colectorului Prin urmare, în baza tranzistorului din apropierea joncțiunii colectorului, concentrația la limită a purtătorilor de sarcină minoritari începe să crească Când această concentrație marginală de purtători minoritari depășește valoarea concentrației de echilibru a purtătoarelor minoritare, tranzistorul va trece din modul activ în modul de saturație În acest moment (curba din Fig , c) curentul colectorului /la noi ~ ^kb//?n ( ) De fapt, valoarea curentului permanent al colectorului ra a tranzistorului în modul saturație, mai multe depășește valoarea curentului de saturație calculată conform ( ), deoarece, pe lângă EMF-ul sursei de energie, trebuie să se ia în considerare și căderea de tensiune pe rezistența de volum în vrac a bazei Când curentul trece prin emițător în direcția înainte, scăderea de tensiune pe rezistența de volum a bazei, așa cum se poate vedea în Fig , trebuie adăugat la EMF al sursei de alimentare din circuitul colectorului: /k \u d /Knas \u d (£KB + ( ) Orez Explicația unei modificări bruște a curentului colectorului datorită unei modificări a polarității căderii de tensiune pe rezistența de volum a bazei atunci când direcția curentului emițătorului se schimbă Intervalul de timp în care curentul colectorului crește de la la % din amplitudinea sa se numește timp de creștere pentru un tranzistor bipolar / Hp (vezi Fig) Intervalul de timp, care este suma timpului pentru întârziere și timp de creștere, apelat este determinată de timpul de pornire al tranzistorului bipolar Timpul de pornire al tranzistorului bipolar depinde de amplitudinea impulsului de curent continuu al emițătorului și de proprietățile de frecvență ale tranzistorului, precum și de $KB și /? n În momentul schimbării direcției curentului emițătorului, are loc o modificare a polarității căderii de tensiune pe rezistența în vrac a bazei (Fig) În același timp, scădeți brusc valoarea curentului de colector fluctuează, deoarece /k - ($KB - AÍ?)//?h ( ) În același timp, începe procesul de resorbție a purtătorilor de sarcină minori acumulați în baza tranzistorului În primul moment după o schimbare a direcției curentului emițătorului, concentrațiile limită ale purtătorilor minoritari în bază

lângă joncțiunile pn ale emițătorului și colectorului sunt mari: depășesc valoarea concentrației de echilibru a purtătorilor minoritari Prin urmare, rezistențele acestor tranziții pentru curenți inversi se dovedesc a fi foarte mic Valorile curenților inversi ale emițătorului și colectorului sunt determinate în principal de rezistențele din circuitele externe și EMF ale surselor de alimentare Concentrațiile la limită ale purtătorilor minoritari în bază lângă joncțiunile p-n nu pot scădea instantaneu la zero după comutarea intrării tranzistorului Acest lucru ar corespunde gradienților de concentrație infinit de mari ai purtătorilor de sarcină minoritari în bază în apropierea joncțiunilor p-n și curenților infinit de mari, care practic nu se pot datora valorilor de rezistență finite în circuitele externe ale tranzistorului Până când concentrațiile la limită ale purtătorilor de sarcină minoritari din baza de lângă joncțiunile pn scad la zero în timpul procesului de absorbție, curenții inversi prin joncțiunile pn corespunzătoare vor rămâne constanti, adică curenții emițătorului și colectorului vor rămâne neschimbați până când tranzistorul va fi în modul de saturație După o scădere a concentrațiilor la limită ale purtătorilor de sarcină minoritari din bază în apropierea joncțiunilor până la zero, curenții emițătorului și colectorului vor scădea cu timpul, deoarece procesul de resorbție a purtătorilor de sarcină minoritari de la bază continuă și valoarea absolută a gradienților de concentrație a purtătorilor de sarcină minoritari în apropierea joncțiunilor pn corespunzătoare scade Schimbările în distribuția purtătorilor de sarcină minoritari în momente diferite ale procesului de resorbție sunt prezentate în Fig , oraș Intervalul de timp dintre momentul în care un impuls de oprire este aplicat la intrarea tranzistorului și momentul în care curentul colectorului atinge un nivel predeterminat (de exemplu, , / Knas) se numește timp de resorbție pentru un tranzistor bipolar tpac Intervalul de timp dintre momentele scaderii curentului de iesire de la valoarea corespunzatoare la % din amplitudinea acestuia la valoarea corespunzatoare la % din amplitudinea sa se numeste timpul de decadere pentru tranzistorul bipolar tcn (vezi Fig) Intervalul de timp dintre momentul în care pulsul de poartă este aplicat la intrarea tranzistorului și momentul în care curentul colectorului atinge o valoare corespunzătoare cu % din valoarea sa de amplitudine se numește timpul de oprire a tranzistorului bipolar /off Timpul de resorbție, timpul de cădere și, în consecință, timpul de oprire al tranzistorului depind de amplitudinea pulsului curentului de comutare directă al emițătorului, de EMF al sursei de alimentare și de rezistența de sarcină în circuitul colectorului și de asemenea asupra proprietăţilor de frecvenţă ale tranzistorului Este posibilă creșterea vitezei unui tranzistor care funcționează ca o cheie electronică, adică reducerea timpului de resorbție, prin introducerea de impurități ale capcanelor de recombinare (aur pentru siliciu) în cristalul semiconductor În acest caz, durata de viață a operatorilor minoritari de taxe va fi redusă Cu toate acestea, împreună cu o creștere a vitezei la astfel de tranzistori, în primul rând, vor exista mai puțini coeficienți de transfer de curent datorită recombinării mai intense a purtătorilor de sarcină minoritari în bază În al doilea rând, vor avea un curent invers de colector și emițător mai mare datorită generării termice mai intense a purtătorilor de sarcină în joncțiunile colector și emițător pn, precum și în zonele adiacente acestor joncțiuni O metodă mai reușită de creștere a vitezei unui tranzistor care funcționează ca un comutator electronic este manevrarea joncțiunii colectorului cu o diodă Schottky, în care, cu polarizarea directă, nu

există injectarea purtătorilor de sarcină minori și acumularea lor Structura și principiul de funcționare a unui astfel de tranzistor cu o diodă Schottky vor fi discutate în § , deoarece astfel de tranzistoare sunt utilizate pe scară largă în circuitele integrate Circuit emițător comun Într-un tranzistor conectat conform schemei cu un emițător comun, atunci când funcționează pe impulsuri cu o amplitudine mare, au loc aceleași procese de acumulare și resorbție a purtătorilor de sarcină minori în bază Pe fig arată dependențele de timp ale curentului de bază și curent de colector atunci când tranzistorul este pornit conform circuitului cu un emițător comun O caracteristică a dependenței de timp în acest caz, în comparație cu o dependență similară a curentului de colector într-un circuit cu o bază comună, este o creștere bruscă a curentului de colector atunci când direcția curentului de bază se schimbă de la /Bi la /B Curentul de comutare de intrare /Bi corespunde potențialului negativ al ieșirii de bază ¿/Bi față de ieșirea emițătorului comun (Fig) Prin urmare, neglijând rezistența tranzistorului în modul de saturație, DESPRE - OLknas I"- fi) O tu mp * pentru noi Orez Dependențe de timp ale curentului de bază (a) și curentului de colector (b) atunci când tranzistorul funcționează ca o cheie conform circuitului emițător comun /k~(, W); în funcție de valoarea frecvenței de tăiere a coeficientului de transfer de curent - la tranzistori de frecvență joasă (frp MHz) Metode de formare a structurilor de tranzistori În perioada inițială a dezvoltării tehnologiei tranzistorilor, tranzistoarele bipolare au fost fabricate numai din germaniu prin metoda de fuziune a impurităților - tranzistoare din aliaj În anii următori, după ce au depășit o serie de dificultăți în purificarea siliciului monocristal, au fost create tranzistoare de siliciu Siliciul are un interval de bandă mai mare Prin urmare, tranzistoarele de siliciu pot funcționa la temperaturi mai ridicate (până la ° C), au curenți inversi mai mici de colector și emițător și tensiuni de defalcare mai mari Pe monocristalele de siliciu, este relativ ușor să se creeze un strat de dioxid de siliciu, care are proprietăți de mascare, prin difuzia dopanților în siliciu Acest lucru a condus în producția de tranzistori de siliciu și alte dispozitive de siliciu la utilizarea pe scară largă a metodelor de înaltă performanță și precise ale tehnologiei plane În legătură cu avantajele enumerate, tranzistoarele bipolare cu siliciu au înlocuit aproape complet dispozitivele similare cu germaniu Principala metodă de formare a structurilor de tranzistoare ale tranzistoarelor moderne este tehnologia plană (vezi §) Tranzistoarele realizate folosind această tehnologie se numesc planare Unul dintre avantajele tehnologiei planare Logica constă în versatilitatea sa, care permite unuia și aceluiași echipament să organizeze producția de tranzistori cu parametri diferiți prin schimbarea setului de măști foto și a modurilor de difuzie a impurităților Cu tehnologia plană, este posibil să se creeze tranzistori cu proprietăți bune de frecvență Acest lucru se datorează faptului că în acest caz este posibil să se efectueze difuzie selectivă, adică să se introducă impurități numai în zone limitate mici, controlând strict adâncimea difuziei În același timp, metodele optice utilizate în fotolitografie fac posibilă combinarea acestor regiuni cu o mai mare acuratețe Ca rezultat, este posibil să se producă tranzistori cu o grosime de bază de fracțiuni de micrometru și dimensiuni ale joncțiunilor electrice de redresare de câțiva micrometri Frecvența de tăiere a coeficientului de transfer de curent al tranzistoarelor bipolare ajunge la GHz Punctele de ieșire ale joncțiunilor pn ale unui tranzistor plan de pe suprafața unui cristal

semiconductor sunt sub un strat de dioxid de siliciu, care este un bun dielectric Acesta servește la protejarea suprafeței de siliciu de influențele externe, crescând stabilitatea parametrilor și fiabilitatea tranzistoarelor Pentru a spori proprietățile de protecție ale stratului de dioxid de siliciu, deasupra se aplică un strat subțire de sticlă fuzibilă Pentru a reduce rezistența de volum a regiunii colectoare a tranzistorului, formarea structurii tranzistorului se realizează într-un strat epitaxial subțire cu o concentrație relativ scăzută de impurități depuse pe un substrat cu rezistență scăzută cu conductivitate electrică de același tip De exemplu, cu un substrat și un strat epitaxial cu conductivitate electrică de tip η, structura de tranzistor de tip n+-p-n-n+ rezultată are o regiune colectoare cu două straturi constând dintr-o parte subțire de înaltă rezistență a stratului epitaxial și o zonă scăzută -substrat rezistent Joncțiunea colectorului, situată într-un strat epitaxial de înaltă rezistență, are o capacitate de barieră mică și o tensiune mare de defalcare Tranzistorii cu o astfel de structură se numesc epitaxial-planari Ele alcătuiesc cea mai mare parte a tranzistoarelor produse în masă Metode de creștere a tensiunii de avarie a joncțiunii colectorului Tensiunea de defalcare a joncțiunii colectorului (și emițătorului) a unui tranzistor plan sau epitaxial-planar se poate dovedi a fi scăzută, în primul rând, din cauza incluziunilor străine și a defectelor care pot fi în cristalul semiconductor original sau pot apărea în regiunea de încărcare spațială a joncțiunile în timpul formării lor Probabilitatea de incluziuni străine, fisuri și alte defecte în apropierea suprafeței cristalului este deosebit de mare Ele rămân acolo după diferite tratamente de suprafață Incluziunile străine, desigur, diferă de valorile semiconductoare ale permitivității și rezistivității relative De aceea, incluziunile străine conduc la o distorsiune a modelului câmpului electric și la o scădere a tensiunii de defalcare Este posibilă reducerea probabilității de incluziuni și defecte străine numai prin îmbunătățirea calității materiilor prime și îndeplinirea tuturor cerințelor procesului tehnologic Orez Structuri ale tranzistoarelor epitaxiale planare (a) și mesaplanare (b): / este un strat de siliciu epitaxial cu o grosime de aproximativ µm; - un substrat de siliciu puternic dopat cu o grosime de aproximativ de microni În al doilea rând, tensiunea de rupere a joncțiunii colectorului poate fi scăzută din cauza defectării suprafeței din cauza densității mari a stărilor de suprafață de un anumit tip și a prezenței unui strat îmbogățit pe suprafața unei regiuni de înaltă rezistență adiacentă joncțiunii (vezi §) Acest tip de defalcare a joncțiunii poate exista chiar și în cristale a căror suprafață nu prezintă perturbări mecanice Pentru a reduce probabilitatea unei astfel de defecțiuni, este necesar să se utilizeze metode care să asigure cea mai scăzută densitate a stărilor de suprafață la prelucrarea suprafeței cristalului și la creșterea unui strat de dioxid de siliciu În al treilea rând, tensiunea de rupere a joncțiunii poate fi redusă datorită curburii joncțiunii pn la marginile acesteia (Fig , a) Intensitatea câmpului electric este întotdeauna mai mare în apropierea proeminențelor ascuțite, unde liniile de forță curente se îngroașă Adâncimea joncțiunilor pn în tranzistoarele fabricate folosind tehnologia plană este de obicei de la zecimi la unități de micrometri Aceasta înseamnă că raza de curbură a joncțiunilor p-n în punctele de ieșire a acestora pe suprafața cristalului este, în cel mai bun caz, de câțiva micrometri Reducerea razei de curbură a marginilor joncțiunii pn cu un ordin de mărime duce la o scădere a tensiunii de rupere și cu

aproximativ un ordin de mărime Una dintre metodele de eliminare a defalcării asociate cu curbura joncțiunii p-n este gravarea selectivă a părții cristalului în care se află marginile rotunjite ale joncțiunii (Fig) Structura unui tranzistor obținut prin gravare selectivă se numește structură mesa, iar tranzistoarele cu structură mesa, în care joncțiunile pn sunt formate prin tehnologie plană, se numesc mesaplanare În structura tranzistorului mesaplanar rămâne doar partea plată a joncțiunii colectorului, care are o tensiune de rupere mult mai mare La gravarea părților rotunjite ale joncțiunii colectorului, se îndepărtează secțiunile apropiate de suprafață ale bazei și ale colectorului, care au cel mai mare număr de încălcări ale rețelei cristaline și Orez , Parte a joncțiunii colectorului îndreptată spre suprafața cristalului de siliciu într-un tranzistor cu un electrod de bază extins (cu metalizare de oxid): limite de tranziție fără tensiune externă; limite de tranziție la tensiune inversă; - limita de tranziție metalurgică Orez , Partea periferică a structurii unui tranzistor epitaxial-planar cu un inel de protecție a difuziei format prin difuzie suplimentară a acceptoarelor alte defecte, ceea ce crește și tensiunea de avarie O altă metodă de creștere a tensiunii de rupere este crearea unui electrod metalic expandat către regiunea de bază, extinzându-se peste stratul de dioxid de siliciu deasupra joncțiunii colectorului și parțial deasupra regiunii colectorului (Figura) Când o tensiune este aplicată joncțiunii colectorului în direcția opusă sub partea extinsă a electrodului de bază în regiunea colectorului de lângă suprafață, apare un strat epuizat în purtătorii majoritari (în acest caz, electroni) Acest lucru duce la o grosime mai mare a joncțiunii colectoare în apropierea suprafeței cristalului în comparație cu grosimea părții sale plate, precum și la o scădere a curburii joncțiunii Toate acestea contribuie la creșterea tensiunii de defalcare a joncțiunii colectorului de lângă suprafața cristalului O altă metodă de creștere a tensiunii de rupere a joncțiunii colectorului este formarea unui inel de protecție în punctul în care joncțiunea iese pe suprafața cristalului (Fig) Acest lucru necesită difuzie suplimentară acceptoare (pentru un tranzistor de tip npn) de-a lungul periferiei joncțiunii colectorului cu toate operațiile auxiliare de oxidare, fotolitografie etc , efectuând această difuzie la o adâncime mai mare în comparație cu difuzia în timpul formării regiunii de bază Ca urmare, curbura joncțiunii colectorului scade în punctele în care iese pe suprafața cristalului sau, cu alte cuvinte, raza de curbură în partea periferică a tranziției crește În cele din urmă, tensiunea de defalcare a joncțiunii colectorului poate fi crescută prin metoda formării inelelor de divizare a difuziei (Fig) Inelele divizoare de difuzie se formează simultan cu crearea regiunii de bază a tranzistorului la o anumită distanță de acesta Cu tensiune inversă În joncțiunea colectorului, această joncțiune se extinde și se închide cu joncțiunea celui mai apropiat inel de difuzie Un potențial plutitor este setat pe acest prim inel de difuzie și o tensiune inversă este setată pe joncțiunea p-n a primului inel de difuzie, care este mai mică în valoare absolută decât colectorul Orez , Partea periferică a joncțiunii colectorului cu două inele distanțiere de difuzie create simultan cu formarea regiunii de bază cu conductivitate electrică de tip p tranziție spinoasă În prezența unui al doilea inel de difuzie, joncțiunea sa p-n se îmbină cu tranziția primului inel de difuzie Primul inel de difuzie poate fi prevăzut cu un electrod extins peste stratul de dioxid de siliciu până la al doilea inel de difuzie Acest un electrod care nu este conectat nicăieri și are o placă un potențial negativ în ceea ce privește

colectorul, va contribui la închiderea tranzițiilor primului și celui de-al doilea diferențial inele de separare prin fuziune Particularități proiecte și structuri ale tranzistoarelor de putere La dezvoltarea tranzistoarelor de mare putere, pe lângă acele sarcini care sunt rezolvate la crearea tranzistoarelor de putere redusă, trebuie rezolvate următoarele probleme specifice:) tranzistoarele puternice funcționează la curenți destul de mari, prin urmare, efectele asociate cu aceasta sunt deosebit de pronunțate la ei și acest lucru trebuie prevăzut (vezi §);) pentru a asigura o putere suficientă în sarcină, se folosesc de obicei surse de alimentare cu o tensiune înaltă, prin urmare, cel mai adesea, tranzistoarele puternice trebuie proiectate pentru tensiuni de avarie mai mari decât cele de putere redusă;) tranzistoarele puternice trebuie să aibă o eficiență ridicată și, în special, o mică cădere de tensiune pe tranzistor în modul de saturație, adică rezistență scăzută la saturație;) proiectarea unui tranzistor puternic trebuie să asigure îndepărtarea eficientă a căldurii disipate în acesta;) supraîncălzirea semnificativă a părților active ale unui tranzistor puternic cu dimensiuni mari de cristale semiconductoare utilizate în acesta face necesară luarea în considerare a tensiunilor mecanice care pot apărea din cauza diferențelor de temperatură Orez , Geometria electrozilor unui tranzistor cu microunde de mare putere: a - proiectare cu un emițător pieptene; b - design multi-emițător cu emițători de dungi; (c) proiectare cu mai mulți emițători cu emițători rotunzi; / - electrod de bază; - emițător; - electrod emițător coeficienții liniari de dilatare liniară a semiconductorului și a altor elemente structurale În plus, tranzistoarele puternice trebuie să fie suficient de rapide Pentru a furniza curenți mari în tranzistoare, sunt necesare suprafețe mari de emițător Cu toate acestea, o simplă creștere a dimensiunii emițătorului ar duce la o deplasare semnificativă a curentului către marginile joncțiunii emițătorului din cauza căderii de tensiune pe rezistența de volum a bazei Tehnologia plană pentru formarea structurilor de tranzistori face posibilă fabricarea emițătorilor de formă complexă Una dintre opțiunile pentru structura tranzistoarelor planare puternice este un emițător pieptene (Fig , a) Numărul de dinți ai "pieptenului" poate fi de până la câteva zeci Deoarece lățimea fiecărui dinte este mică, efectul deplasării curentului la marginea emițătorului este neglijabil În același timp, rezistența de bază este redusă, ceea ce crește câștigul de putere la frecvență înaltă și reduce rezistența la saturație Cu toate acestea, dacă benzile emițătoare sunt prea înguste și lungi, scăderea de tensiune de-a lungul lor la curenți mari poate afecta Alte opțiuni pentru structurile tranzistoarelor puternice sunt structurile cu un număr mare de emițători neconectați sub formă de benzi (Fig , b) sau discuri (Fig , c) Acești emițători sunt conectați unul la altul prin placare peste un strat de dioxid de siliciu Pentru a asigura o mai bună disipare a căldurii, un cristal semiconductor cu structura unui tranzistor puternic este lipit pe suportul de cristal cu partea colectorului Dacă este necesar din colector din carcasa tranzistorului, apoi între cristal semiconductor și suport de cristal este plasată o garnitură izolatoare din ceramică de beriliu, care are o conductivitate termică bună (Fig) Baza carcasei - suportul de cristal - este din cupru Deoarece disiparea căldurii din carcasă ar trebui de obicei efectuată pe șasiul întregului dispozitiv sau pe radiator, pentru a reduce rezistența termică, suprafața inferioară a bazei carcasei nu este vopsită Caracteristici ale designului și structurii tranzistoarelor cu microunde Aproape toate tranzistoarele cu microunde,

ca și alte tranzistoare bipolare, sunt tranzistoare plane epitaxiale de siliciu Substratul cu rezistență scăzută al structurii epitaxiale originale oferă o rezistență scăzută a regiunii colectoare și limitează acumularea de purtători în această regiune Pentru a obține proprietăți bune de frecvență, valorile parametrilor paraziți și dimensiunile părților active ale structurii tranzistorului Prin urmare, grosimea bazei tranzistoarelor cu microunde este uneori mai mică de , µm, lățimea benzilor emițătoare este mai mică de µm Pentru a reduce rezistența în vrac a bazei la grosimea sa mică, este necesară o concentrație mare de impurități în bază O metodă promițătoare pentru formarea regiunilor de bază și emițătoare de mici dimensiunile şi cu concentraţia necesară de impurităţi este metoda de implantare ionică Orez , Designul unui tranzistor puternic cu microunde: / - o farfurie din ceramică de beriliu; - flanșă; - inel; - balon; - ceramică izolator; - ieșire internă; - tub; - ieșire externă; - cristal semiconductor Formarea regiunilor de bază subțiri provoacă necesitatea posibilitatea de a avea straturi epitaxiale de siliciu cu o rețea cristalină aproape perfectă fără luxații și alte defecte de stivuire Operațiunile tehnologice utilizate la crearea structurilor tranzistoarelor nu ar trebui să conducă la formarea unor astfel de defecte În caz contrar, va exista o probabilitate mare de scurtcircuitare a regiunilor emițătorului și colectorului Funcționarea unui tranzistor în regiunea de microunde poate fi afectată de capacitățile dintre terminale și de inductanța terminalelor Prin urmare, sunt utilizate ieșiri de bandă cu inductanță redusă Pentru a reduce capacitățile parazitare, este de dorit să se izoleze carcasa tranzistorului cu microunde împreună cu radiatorul, dacă există, de regiunea colectorului, menținând în același timp o bună disipare a căldurii din joncțiunea colectorului Acest lucru se realizează prin atașarea unui cristal de siliciu cu o structură de tranzistor la o placă ceramică de beriliu (Fig) Principalele dificultăți apar la crearea tranzistoarelor cu microunde de mare putere, deoarece cerințele pentru structura unui tranzistor de înaltă frecvență contrazic practic cerințele pentru structura unui tranzistor de mare putere Deci, unul dintre principalii factori care limitează intervalul de frecvență de funcționare a unui tranzistor cu microunde este timpul de zbor al purtătorilor de sarcină prin joncțiunea colectorului (vezi §) Pentru a crește frecvența de funcționare, este de dorit să se reducă grosimea joncțiunii colectorului Cu toate acestea, tensiunea de avarie se dovedește a fi mică Ca rezultat, tranzistoarele cu microunde cu frecvențe de tăiere înalte au o putere de disipare maximă admisă mai mică Cele mai bune dintre tranzistoarele cu microunde de astăzi cu frecvențe de tăiere de câtiva gigaherți sunt proiectate pentru o disipare maximă admisă a puterii în timpul funcționării continue de câțiva wați § TRANZISTORI SINGURI Structura unui tranzistor unijunction și circuitul său echivalent sunt prezentate în fig , Regiunea emițătorului (regiunea cu conductivitate electrică de tip p) trebuie dopată mai puternic decât regiunea de bază (regiunea cu conductivitate electrică de tip η), astfel încât atunci când joncțiunea emițătorului este pornită direct, curentul direct prin ea are practic doar o componentă de gaură În acest caz, din cauza injectării purtătorilor minoritari în baza tranzistorului și datorită acumulării de purtători majori care intră în bază printr-unul dintre contactele neredresoare la bază pentru a compensa încărcătura injectată a purtătorilor minoritari, va exista o scădere a rezistenței de bază (modulație) și o creștere a curentului între contactele neredresoare la bază sau curentul din

circuitul de sarcină Dacă la bornele de bază ale dispozitivului se aplică o tensiune interbază Ub bi, atunci din cauza trecerii curentului /b de-a lungul bazei, va exista o cădere de tensiune longitudinală Să notăm căderea de tensiune pe partea bazei cu lungimea de \ (Fig , a) ca î / bh Această cădere de tensiune inversă polarizează joncțiunea p-n Prin urmare, când tensiunea de la emițător ¿ ebo k $ % Tensiune inversă pe tiristorul diodei Cu o tensiune inversă pe tiristor, adică cu un potențial negativ la anod, joncțiunile emițătorului sunt polarizate în direcția opusă, iar joncțiunea colectorului este polarizată înainte În acest caz, nu există condiții pentru comutarea tiristorului, iar tensiunea inversă poate fi limitată fie de o avalanșă a joncțiunilor emițătorului, fie de efectul închiderii joncțiunii ca urmare a extinderii unuia dintre emițătorii polarizat invers joncțiuni pe toată grosimea bazei ușor dopate Pe fig Figura prezintă valorile calculate ale tensiunii de rupere în timpul defectării avalanșei și în timpul efectului de închidere, în funcție de concentrația donatorilor într-o bază η ușor dopată pentru diferite grosimi ale acestei baze Pentru fiecare grosime de bază, tensiunea inversă de pe tiristor este limitată de defalcarea avalanșei la concentrații mari de impurități în bază, deoarece în acest caz grosimea joncțiunii emițătorului va fi mică (vezi § și, în special, Fig , A) Într-o joncțiune subțire, puterea câmpului electric necesară pentru șoc ionizarea va avea loc la tensiuni mai mici La concentrații scăzute de impurități în bază, tensiunea inversă de pe tiristor va fi limitată de efectul închiderii joncțiunii, deoarece grosimea joncțiunii pn este cu atât mai mare, cu atât concentrația de impurități în bază este mai mică [vezi Fig relația ( ) în §] Rețineți că fenomenele fizice considerate limitează nu numai tensiunile inverse, ci și tensiunile de pornire ale tiristoarelor Numai cu o tensiune directă pe tiristor poate avea loc ionizarea impactului în joncțiunea colectorului, io' * Orez Dependența tensiunii de rupere în timpul unei avalanșe a unei joncțiuni p-n ascuțite asimetrice de siliciu (linie întreruptă) și în timpul efectului închiderii joncțiunii tiristoarelor (linii continue) asupra concentrației donorului într-o bază η ușor dopată pentru diferite grosimi ale acestei baze care este polarizat invers când tiristorul este oprit, iar efectul de închidere se poate datora extinderii joncțiunii colectorului § DIODĂ TIRISTOR CU JONCȚIUNE EMITĂTOR ORIENTAT Trecerea tiristorului din starea închisă în starea deschisă în conformitate cu ( ) are loc atunci când coeficientul de transfer al curentului diferenţial total creşte la unitate În același timp, în fiecare dintre structurile tranzistorului care alcătuiesc tiristorul, coeficienții de transfer al curentului emițătorului pot fi aproape de unitate deja la tensiuni și curenți scăzute Pentru a reduce valoarea inițială a coeficientului de transmisie, una dintre regiunile de bază ale tuturor tiristoarelor este realizată relativ groasă (până la µm) Pentru a reduce coeficientul de transfer de curent al emițătorului altui tranzistor, joncțiunea emițătorului acestuia este shuntată de rezistența de volum a regiunii de bază adiacente (Fig) O astfel de manevră se realizează prin aplicarea unuia dintre electrozii principali (de exemplu, un catod) nu numai pe regiunea emițătorului, ci și parțial pe suprafața regiunii de bază adiacente Derivarea oferă valori scăzute ale coeficientului de transfer de curent la tensiune joasă tiristor, deoarece aproape tot curentul trece prin rezistența de șunt a bazei, ocolind joncțiunea emițătorului din stânga (Fig) datorită rezistenței sale relativ mari la tensiuni joase La tensiuni înalte pornite Orez Structura unui tiristor de diodă cu o joncțiune de emițător șuntat tiristor, rezistența joncțiunii emițătorului din stânga

devine mai mică decât rezistența la șunt a bazei Aceasta înseamnă că acum aproape tot curentul va trece prin joncțiunea emițătorului și va fi cauzat de injectarea purtătorilor de sarcină minoritari în regiunea de bază adiacentă Derivarea, în primul rând, face posibilă crearea tiristoarelor cu tensiuni ridicate de pornire În al doilea rând, la derivația joncțiunii emițătorului, se obține o dependență mai accentuată a coeficientului de transfer de curent de tensiune și curent Prin urmare, un tiristor cu o joncțiune de emițător șuntat va avea așa-numita caracteristică de comutare dură, adică va trece de la starea închisă la starea deschisă de fiecare dată la aceeași tensiune de pornire Dimpotrivă, cu o dependență slabă a coeficientului de transfer de curent de tensiune și curent, comutarea tiristorului din starea închisă în starea deschisă poate avea loc la diferite valorile tensiunii de pornire, adică tiristorul în acest caz va avea așa-numita caracteristică de comutare soft § TRIODE TIRISTORI Pentru a comuta un tiristor triodă dintr-o stare închisă la o stare deschisă, este, de asemenea, necesar să se acumuleze purtători de sarcină neechilibrați în regiunile de bază Într-un tiristor cu diodă, pe măsură ce tensiunea peste el crește până la tensiunea de pornire, această acumulare de purtători de sarcină neechilibrați are loc de obicei fie din cauza creșterii nivelului de injecție prin joncțiunile emițătorului, fie din cauza ionizării impactului în joncțiunea colectorului Într-un tiristor triodă având o ieșire de control de la Orez Reprezentare schematică a structurilor tiristoarelor triode cu o joncțiune ohmică între electrodul de control și bază (a), cu o joncțiune pn suplimentară sub electrodul de control (b) și caracteristica curent-tensiune a unui tiristor triodă la diferiți curenți (/ y>/£>/y) prin electrodul de control (V) una dintre zonele de bază cu o joncțiune ohmică între electrodul de control și bază (Fig , a), nivelul de injecție prin joncțiunea emițătorului adiacent acestei baze poate fi crescut prin aplicarea unei tensiuni pozitive față de catod la electrod de control Prin urmare, un tiristor triodă poate fi comutat de la o stare închisă la una deschisă la momentul necesar chiar și cu o tensiune anodică mică (Fig , c) Comutarea unui tiristor triodă prin aplicarea tensiunii continue la electrodul de control sau a curentului prin acest electrod poate fi reprezentată dintr-un punct de vedere diferit ca transferarea structurii tranzistorului p-p-p în modul de saturație la un curent de bază mare În acest caz, joncțiunea colector a structurii tranzistorului (este și joncțiunea colector a tiristorului) este deplasată în direcția înainte Balanța curentului într-un tiristor triodă poate fi scris prin analogie cu ( ), dar ținând cont de faptul că suma curenților principal și de control trece prin joncțiunea emițătorului din stânga (Fig , a): /a \u d C (/a "/y) "CI / a " / KBO ( ) SAU / a (- oc i - ar) \u d / kbo "ai / y ( ) Astfel, caracteristica I-V a unui tiristor triodă în stare închisă: (,) G ^KBO ! " / a -= r = - y, - Q - " - " - " unde ai -" ^SInas; - grosimea joncțiunii p-p a porții Curentul de scurgere aproape că nu crește odată cu o creștere suplimentară a tensiunii de drenaj Când tensiunea dintre poartă și sursă este egală cu zero, iar când tensiunea de dren este egală sau mai mare decât tensiunea de saturație, curentul de dren se numește curent de dren inițial /sn Partea caracteristicii corespunzătoare saturației a curentului de scurgere se numește partea plată Ar trebui să se țină cont de natura condiționată a conceptului de "suprapunere" a canalului cu o creștere a tensiunii de scurgere și o tensiune constantă a porții în raport cu sursa, deoarece suprapunerea canalului în aceste condiții este o consecință a creșterii curent de scurgere Astfel, se poate presupune

că, ca urmare a creșterii curentului de scurgere sau a tensiunii de scurgere, o anumită secțiune transversală mică a canalului este stabilită automat pe partea laterală a electrodului de drenaj creșterea suplimentară a tensiunii de scurgere crește lungimea părții blocate a canalului și crește rezistența statică a canalului Dacă lungimea părții blocate a canalului crește proporțional cu tensiunea de drenaj, atunci curentul de drenaj nu s-ar modifica la tensiunile de drenaj care depășesc tensiunea de saturație Cu toate acestea, lungimea Partea acoperită a canalului crește din cauza creșterii grosimii joncțiunii p-n cu creșterea tensiunii de drenaj (Fig), iar grosimea joncțiunii p-n este proporțională fie cu rădăcina pătrată, fie cu rădăcina cubă a tensiunii (vezi § și) Prin urmare, în partea plată a caracteristicii, există o creștere ușoară a curentului de drenaj cu o creștere a tensiunii de drenaj Acum să ne uităm la polarizarea și modificarea caracteristicilor statice cu o modificare a tensiunii porții Când o tensiune de o astfel de polaritate în raport cu sursa este aplicată la poartă, ceea ce corespunde polarării inverse a joncțiunii pn a porții și cu o creștere a acestei tensiuni, secțiunea transversală inițială a canalului scade în valoare absolută Prin urmare, secțiunile inițiale ale caracteristicilor statice de ieșire la tensiuni de poartă altele decât zero au o pantă diferită, corespunzătoare rezistențelor inițiale mari ale canalului static Cu secțiuni transversale inițiale mai mici, canalul se suprapune datorită creșterii tensiunii de dren la tensiuni de saturație mai mici (vezi Fig , a) La tensiuni înalte pe canalizare, poate apărea o defecțiune joncțiune p-n-obturator Tensiunea inversă la joncțiunea p-n a porții variază pe lungimea canalului, atingând o valoare maximă la capătul de scurgere al canalului Tensiunea aplicată joncțiunii p-n porții în această locație este suma tensiunilor de dren și de poartă Astfel, defectarea FET-ului poate apărea la tensiuni de drenaj diferite, în funcție de tensiunea de poartă Cu cât tensiunea la poartă este mai mare, cu atât este mai mică tensiunea la dren, la care se va produce o defalcare a joncțiunii pn a porții (vezi Fig , a) Tranzistoarele cu efect de câmp sunt de obicei fabricate pe bază de siliciu Prin urmare, defalcarea unor astfel de tranzistori are un caracter de avalanșă Caracteristicile de transmisie statică ale unui tranzistor cu efect de câmp în conformitate cu ( ) sunt dependențele curentului de drenaj de tensiunea de poartă la diferite tensiuni de drenaj constante Deoarece principalul mod de funcționare al tranzistoarelor cu efect de câmp este modul de saturație a curentului de drenaj, care corespunde părților plate ale caracteristicilor statice de ieșire, dependența curentului de saturație de tensiunea de poartă la o tensiune de drenaj constantă este de cel mai mare interes Natura acestei dependențe este clară din principiul funcționării unui tranzistor cu efect de câmp cu o joncțiune pn de control Când tensiunea de dren se modifică, schimbarea caracteristicilor de transmisie poate fi practic neglijată din cauza modificării mici a curentului în partea plată a caracteristicilor statice de ieșire (vezi Fig , b) Tensiunea dintre poarta și sursa unui FET cu o joncțiune de control la care curentul de scurgere atinge o valoare scăzută predeterminată se numește tensiune de tăiere a FET-ului Znogs La luarea în considerare a caracteristicilor statice ale tranzistorului cu efect de câmp, s-au remarcat principalii săi parametri statici Din caracteristica de transmisie statică, se poate determina un alt parametru principal al unui tranzistor cu efect de câmp care îi caracterizează proprietățile de amplificare - panta caracteristicii tranzistorului cu efect de câmp S, care este raportul dintre modificarea curentului de scurgere și

modificarea porții tensiune în timpul unui scurtcircuit de curent alternativ la ieșirea tranzistorului într-un circuit cu o sursă comună: S = -^\ dU^ I í/si = corist Panta tranzistorului cu efect de câmp este de obicei de câțiva miliamperi pe volt § CALCULUL CARACTERISTICILOR STATICE DE IEȘIRE ALE UNUI TRANZISTOR DE CÂMP CU TRANZIȚIE DE CONTROL Orez Structura părții de lucru a unui tranzistor cu efect de câmp cu joncțiuni pn de control Neglijând rezistența de volum a cristalului semiconductor în zonele dintre capetele canalului și contactele sursă și dren, partea de lucru a tranzistorului cu efect de câmp poate fi reprezentată într-o formă simplificată (Fig) Densitatea curentului canalului J = yE=-y^, (,) unde γ este conductivitatea specifică a canalului În prima aproximare, vom considera conductivitatea specifică a materialului canalului ca fiind independentă de intensitatea câmpului electric, adică nu vom lua în considerare modificarea mobilității Densitatea de curent în canal se modifică de-a lungul lungimii sale datorită modificării secțiunea canalului și modificarea corespunzătoare a tensiunii Curentul din canalul tranzistorului, neschimbat pe tot canalul, lc = -ybw^ , (,) unde b este lățimea canalului Grosimea canalului w depinde de grosimea joncțiunilor p-/r: w = a - δ (θ) Grosimea joncțiunii p-/r depinde de tensiunea pe ea (vezi §) În expresia ( ), pentru grosimea unei joncțiuni pn ascuțite, se poate neglija diferența de potențial de contact la joncțiunea pn în comparație cu tensiunea inversă relativ mare aplicată la poarta tranzistorului cu efect de câmp Cu toate acestea, este necesar să se țină cont de neechipotențialitatea canalului, care apare din cauza trecerii curentului prin canal de la sursă la scurgere Apoi δ = φ - ^zi) (,) Pentru o notație mai compactă, găsim tensiunea de întrerupere vzvtc Din definiția tensiunii de întrerupere rezultă că grosimea canalului în apropierea drenului la această tensiune este zero, iar δ = A ~ ε g/ / (,) Folosind ( ), ( ) și ( ), obținem (,) w = φ + Vzi ^ZI ots După înlocuirea ( ) în ( ), valoarea absolută a curentului de scurgere Y + ^ZI ^ziots z dx (,) ¿/з(i - (C/c + ¿W/ (,) Rezolvarea acestei ecuații diferențiale cu variabile separabile în condiții la limită:) χ = , φ = și) x==/, φ=£/cu, obținem funcția dorită C YasIotk L SI ^lífoTc unde dssotk = l/(yab) este rezistența dren-sursei în stare deschisă, adică la t i = și la o tensiune de drenaj scăzută (mai mică decât tensiunea de saturație) Expresia ( ) face posibilă găsirea curentului de saturație al tranzistorului cu efect de câmp După cum sa menționat, canalul este blocat la o tensiune de tăiere de ¿ V Modul de saturație va apărea în condiția Vzi + I si = {Lziots , adică la tensiunea de scurgere T^SInas == ^ Ioți U I ( ) Dacă în expresia ( ) înlocuim tensiunea de poartă (I) cu tensiunea de dren la care are loc saturația și tensiunea de întrerupere t / ziots, folosind relația ( ), atunci obținem relația dintre curent și tensiunea de saturație : g c us \u d\ u d I /sInas "b" õ" (T^ZI ots /sInas) X ASIotk L O ^ZI ots us ^ZI ots β b^ Iots^ ■ (,) Pe fig , curba punctată arată dependența /c us \u d K ^ sinas) Această dependență este locul punctelor corespunzătoare curenților și tensiunilor la care tranzistorul cu efect de câmp se saturează De asemenea, este important să se cunoască dependența curentului de saturație de tensiunea de la poarta tranzistorului cu efect de câmp, adică caracteristica de transmisie Această dependență poate fi găsită dacă substituim în expresia ( ) din condiția de saturație ( ) tensiunea la dren /snas /?cL [zuziots Ai;?)] ( ) Deoarece secțiunea plată a caracteristicilor statice de ieșire ale tranzistoarelor cu efect de câmp este, ca și în cazul pentodelor de vid, secțiunea principală de lucru, determinăm

abruptul caracteristicii S în această zonă Diferențiând ( ) față de Uzi, obținem Din expresia ( ) rezultă că, pentru a obține valori mari ale acestui parametru, este necesar să existe o valoare mai mică a drenului de rezistență - sursă în stare deschisă a tranzistorului /? siotk sau o conductivitate specifică mai mare a materialul sursă În același timp, concentrația de impurități și, în consecință, purtătorii de sarcină în canal ar trebui să fie mică, astfel încât, odată cu creșterea tensiunii la joncțiunea pn, aceasta se extinde către canal Astfel, pentru a obține valori mari ale pantei caracteristicii, este de dorit în fabricarea unui tranzistor cu efect de câmp să alegeți un material cu o mobilitate mai mare a purtătorilor de sarcină Valoarea pantei caracteristicii tranzistorului cu efect de câmp este determinată în mare măsură de raportul dintre lățimea canalului b și lungimea sa I Creșterea raportului b / I vă permite să creșteți panta caracteristicii S și curentul de saturație al tranzistorul cu efect de câmp [vezi ( ) și ( )] Conform expresiei ( ), pentru a crește abruptul caracteristicii S, este necesară creșterea grosimii canalului a Cu toate acestea, cu o creștere a grosimii canalului, tensiunea de tăiere și tensiunea de saturație corespunzătoare intrării tranzistorului cu efect de câmp în modul de saturație cresc în mod inacceptabil Deoarece modul de saturație este principalul mod de funcționare al FET-ului, tensiunea de tăiere trebuie să fie scăzută Prin urmare, ei încearcă să reducă grosimea canalului, în ciuda unei ușoare scăderi a abruptului caracteristicii § CIRCUIT ECHIVALENT AL UNUI TRANZISTOR DE CÂMP CU O TRANZIȚIE DE CONTROL Pe baza principiului de funcționare și a structurii tranzistorului cu efect de câmp, este posibil să se realizeze circuitul echivalent al acestuia pentru frecvențe joase (Fig) Rezistențele rc și ri sunt rezistențele în vrac ale cristalului semiconductor în zonele dintre capetele canalului și, respectiv, contactele drenaj și sursă Aceste rezistențe depind de proiectarea tranzistorului și de tehnologia de fabricație a acestuia La frecvențe joase, influența rezistenței rf Orez Circuitul echivalent fizic FET poate fi neglijat în comparație cu rezistența de sarcină de obicei mare din circuitul de scurgere și rezistența mare a canalului diferențial r¡ Rezistența ri comună circuitelor de intrare și ieșire este rezistența feedback-ului intern în tranzistorul cu efect de câmp conectat conform circuitului sursă comună Căderea de tensiune pe această rezistență în timpul trecerii curentului de scurgere este inversată pentru joncțiunea p-n La rândul său, o creștere a tensiunii inverse la joncțiunea pn a porții tranzistorului duce la o scădere a curentului de drenaj: Capacitatele Czi și Css, rezistențele rzi și rcs înlocuiesc joncțiunea pn în acest circuit echivalent cu capacitatea sa de barieră și rezistența diferențială activă mare cu polarizare inversă Generatorul de curent, conectat în paralel cu rezistența canalului, reflectă proprietățile de amplificare ale tranzistorului Curentul acestui generator este proportional cu tensiunea de intrare ¿/zi; coeficientul de proporționalitate este panta caracteristicii S Trebuie avut în vedere faptul că capacitatea și rezistența porții sunt distribuite pe întreaga sa zonă și că rezistența canalului este, de asemenea, distribuită În acest caz, circuitul echivalent al tranzistorului cu efect de câmp ar trebui reprezentat ca un circuit cu parametri distribuiti (Fig) Cu toate acestea, un astfel de circuit este mult mai dificil de determinat proprietățile și caracteristicile tranzistoarelor cu efect de câmp Pe lângă circuitele echivalente fizice ale unui tranzistor cu efect de câmp, se pot imagina și circuite echivalente formale cu parametrii í/-, Z- sau /i- Deoarece rezistențele de intrare

și de ieșire ale tranzistoarelor cu efect de câmp sunt mari, este mai convenabil să măsurați și să setați parametrii complexi ai conductivităților sale circuit echivalent formal (fig) Curenții și tensiunile de la bornele tranzistorului cu efect de câmp în modul semnal mic pentru un circuit cu sursă comună corespund următoarelor ecuații caracteristice ale unei rețele cu patru terminale: și despre și despre Orez Circuit echivalent fizic cu parametrii distribuiți ai unui tranzistor cu efect de câmp A - UIIUzi Ch- ^/ u^ si ï s \u d\u d U \ u&zi H "í / h (,) zio Parametrii ¿/- sunt determinați pentru modurile de scurtcircuit pentru curent alternativ la ieșirea și intrarea tranzistorului: / I / I Y "I ~ ' Y u "' ^ £? z" \u d ' U u U" U" = o ' U u U'" = (,) Dacă aceste moduri sunt reproduse în circuitul echivalent din Fig , atunci putem găsi formule pentru trecerea de la parametrii elementelor concentrate ale circuitului echivalent fizic la ¿/-para- Orez Circuit echivalent formal al unui tranzistor cu efect de câmp corespunzător sistemului de ¿/-parametri metri Neglijând conductivitățile mici ale joncțiunii porții p-n și rezistențele de volum ale semiconductorului lângă sursă și dren, obținem Piiи == /) (Сзс -J" Сзi)> P u == j(l)C c, ( ) ^ u - V n ~ h /)C s Toți acești parametri depind de valorile polarizărilor constante ale electrozilor tranzistorului cu efect de câmp § PROPRIETĂȚI DE FRECVENȚĂ ALE TRANZISTORILOR DE CÂMP CU TRANZIȚIE DE CONTROL Principiul de funcționare al unui tranzistor cu efect de câmp nu este legat de injectarea purtătorilor de sarcină minori în bază și de mișcarea relativ lentă a acestora către joncțiunea colectorului Tranzistorul cu efect de câmp este un dispozitiv fără injecție Prin urmare, proprietățile de inerție și frecvență ale unui tranzistor cu efect de câmp cu o joncțiune de control se datorează inerției procesului de încărcare și descărcare a capacității de barieră a joncțiunii pn a porții Tensiunea la poartă nu se poate schimba instantaneu, deoarece capacitatea de barieră a joncțiunii porții p-n este reîncărcată de curenții care trec prin rezistența canalului distribuit și prin rezistențele în vrac ale cree oțel semiconductor lângă sursă și scurgere Prin urmare, secțiunea transversală a canalului nu se poate schimba instantaneu La frecvențe joase, impedanța de intrare a unui tranzistor cu efect de câmp cu o joncțiune p-n de control este determinată de o valoare mare a lui i Odată cu creșterea frecvenței semnalului de intrare, rezistența totală de intrare a tranzistorului scade din cauza prezenței capacității Czi Prin urmare, pentru a conduce FET-ul la frecvențe înalte, este necesară o putere mare a semnalului de intrare În plus, prezența în tranzistorul cu efect de câmp a capacității de trecere C s, care este similară cu capacitatea rețelei anodului dintr-un tub vid, duce la apariția unui feedback dependent de frecvență în tranzistorul cu efect de câmp Pe măsură ce frecvența crește, feedback-ul prin circuitul gsss crește (vezi Fig), ceea ce este echivalent cu o scădere a impedanței de intrare a tranzistorului cu efect de câmp și o scădere a câștigului acestuia Pentru a obține un câștig optim în circuitele de tranzistori cu efect de câmp real, este necesar să se potrivească rezistențele externe cu rezistențele de intrare și de ieșire ale tranzistorului Prin urmare, există de obicei rezistențe mari în circuitul extern al intrării și ieșirii FET-ului, care măresc semnificativ constantele de timp pentru reîncărcarea capacităților FET-ului În legătură cu motivele de mai sus, frecvențele maxime de funcționare ale circuitelor reale bazate pe tranzistoare cu efect de câmp cu o joncțiune pn de control nu depășesc câteva sute de megaherți § TRANZISTOARE DE CÂMP CU OBLUAN IZOLAT Structurile

tranzistoarelor cu efect de câmp cu poartă izolată sunt prezentate în fig Într-un cristal semiconductor cu o rezistivitate relativ mare, care se numește substrat, sunt create două regiuni puternic dopate cu tip opus de conductivitate electrică Aceste zone sunt acoperite cu electrozi metalici - sursă și scurgere Distanța dintre regiunile sursă și de scurgere puternic dopate poate fi de doar câțiva micrometri Suprafața unui cristal semiconductor dintre sursă și scurgere este acoperită cu un strat dielectric subțire (aproximativ , μm) Pe stratul dielectric este depus un electrod metalic, o poartă Rezultatul este o structură formată dintr-un strat de metal, un dielectric și un semiconductor, adică o structură MIS Un tranzistor cu efect de câmp cu o poartă izolată, în care un dielectric este utilizat ca strat izolator între o poartă metalică și un canal conductor, se numește tranzistor cu efect de câmp tip tranzistor metal - dielectric - semiconductor sau tranzistor MIS Redresarea joncțiunilor electrice de sub sursă și dren poate fi realizată nu numai sub formă de joncțiuni pn, ci și sub formă de joncțiuni Schottky de rectificare, adică prin aplicarea electrozilor metalici sursă și dren direct pe substrat Utilizarea joncțiunilor de redresare Schottky sub sursă și scurgere poate oferi o serie de avantaje în tehnologia de fabricație SiO A) Orez Structuri ale tranzistoarelor cu efect de câmp cu o poartă izolată (cu un canal p): a - cu un canal indus; b - cu canal încorporat Si n-muna б) a unor astfel de tranzistori, precum și îmbunătățirea caracteristicilor acestora Astfel, joncțiunile Schottky au o grosime relativ mică, ceea ce facilitează crearea de tranzistori cu efect de câmp cu un canal conductor foarte scurt Formarea joncțiunilor Schottky are loc la o temperatură relativ scăzută, iar excluderea operațiilor la temperatură înaltă îmbunătățește calitatea stratului dielectric, precum și minimizarea dimensiunii structurii tranzistorului În plus, tranzistoarele MOS cu joncțiuni Schottky sursă și drenaj pot fi fabricate pe semiconductori în care nu este posibil să se obțină joncțiuni p-n de calitate suficient de înaltă Până acum, siliciul a fost principalul semiconductor pentru tranzistoarele cu efect de câmp cu poartă izolată Prin urmare, un strat de dioxid de siliciu S O , crescut pe suprafața unui cristal de siliciu prin oxidare la temperatură înaltă, este de obicei folosit ca dielectric sub poartă Un tranzistor cu efect de câmp cu poartă izolată, în care un oxid semiconductor este utilizat ca strat izolator între fiecare poartă metalică și un canal conductor, se numește tranzistor cu efect de câmp oxid de metal-semiconductor sau MOSFET Cu toate acestea, pentru acești tranzistori, este adesea folosit un termen mai general - tranzistoare MIS Există două tipuri de tranzistoare MOS: cu un canal indus și cu un canal încorporat În tranzistoarele MIS cu canal indus (Fig , a) un canal conductiv între sursa puternic dopată și regiunile de dren și, prin urmare, un curent de drenaj apreciabil apar doar la o anumită polaritate și la o anumită valoare a tensiunii de poartă relativ la sursă, ceea ce se numește tensiune de prag (s/zipor) În tranzistoarele MOS cu un canal încorporat (Fig , b), lângă suprafața semiconductorului de sub poartă la tensiunea de poartă zero față de sursă, există un strat invers - un canal care conectează sursa la dren Arată în fig structuri ale tranzistoarelor cu efect de câmp cu poartă izolată au un substrat cu o conductivitate electrică de tip η Prin urmare, regiunile puternic dopate de sub sursă și dren, precum și canalele induse și încorporate, au conductivitate electrică de tip p Dacă tranzistoare similare sunt create pe un substrat cu conductivitate electrică de tip p, atunci canalul lor va avea conductivitate electrică de tip n

Tranzistoare MD P cu canal indus Principiul de funcționare Cu o tensiune de poartă relativă la sursă egală cu zero și în prezența unei tensiuni de scurgere, curentul de scurgere se dovedește a fi neglijabil Reprezintă curentul invers de joncțiune pn între substrat și regiunea de drenaj puternic dopată La un potențial negativ la poartă (pentru structura prezentată în Fig , a), ca urmare a pătrunderii câmpului electric prin stratul dielectric în semiconductor la tensiuni mici de poartă (mai mici ¿/zipor), un strat uniți de purtătorii de sarcină principali apare în apropierea suprafeței semiconductorului sub regiunea de încărcare a porții și a spațiului constând din atomi de impurități ionizați necompensați La tensiuni de poartă mai mari decât pragul oLipor, un strat invers apare lângă suprafața semiconductorului de sub poartă, care este canalul conductiv dintre sursă și dren Odată cu o schimbare a tensiunii la poartă, se modifică concentrația purtătorilor de sarcină în canalul conductor, precum și grosimea sau secțiunea transversală a canalului conducător, adică rezistența canalului conducător este modulată Principalul motiv pentru modularea rezistenței canalului conductor în tranzistoarele MIS cu un canal indus este modificarea concentrației purtătorilor de sarcină în canalul conductor; în tranzistoarele cu efect de câmp cu o joncțiune de control - o modificare a grosimii sau a secțiunii transversale a canalului Când rezistența canalului conducător se modifică, se schimbă și curentul de drenaj (circuitul de comutare al tranzistorului MIS este similar cu circuitul de comutare al unui tranzistor cu efect de câmp cu o tranziție de control prezentată în Fig , c, unde polaritățile sursele de putere depind de tipul de conductivitate electrică a canalului conductor) Asa de curentul de scurgere în tranzistorul MIS cu un canal indus este controlat Deoarece poarta este separată de substrat printr-un strat dielectric, curentul din circuitul de poartă este neglijabil, la fel și puterea consumată de la sursa de semnal din circuitul de poartă pentru a conduce curentul de scurgere relativ mare Astfel, un tranzistor MIS cu canal indus poate amplifica semnalele electrice din punct de vedere al tensiunii și puterii Principiul amplificării puterii în tranzistoarele MIS poate fi luat în considerare din punctul de vedere al transferului energiei unui câmp electric constant (energia sursei de putere din circuitul de ieșire) către un câmp electric alternativ de către purtătorii de sarcină Acest principiu de amplificare a puterii, comun diverselor dispozitive, a fost luat în considerare în § pentru a explica amplificarea puterii bipolare DESPRE }MA \s=■ V " " ι I la ^¡^ JO ne vedem A)) Orez Caracteristicile statice de ieșire (a) și caracteristicile de transmisie statică (b) ale unui tranzistor MIS cu un canal indus ÎN tranzistoare În tranzistorul MIS, înainte de apariția canalului, aproape toată tensiunea sursei de alimentare din circuitul de scurgere a căzut pe semiconductorul dintre sursă și dren, creând o componentă constantă relativ mare a intensității câmpului electric Sub acțiunea tensiunii asupra porții, în semiconductorul de sub poartă apare un canal, de-a lungul căruia purtătorii de sarcină - găuri - se deplasează de la sursă la scurgere Găurile, care se deplasează în direcția componentei constante a câmpului electric, sunt accelerate de acest câmp, iar energia lor crește datorită energiei sursei de energie din circuitul de scurgere Concomitent cu apariția canalului și apariția purtătorilor de sarcină mobili în acesta, tensiunea de scurgere scade, adică valoarea instantanee a componentei variabile a câmpului electric din canal este îndreptată opus componentului constant Prin urmare, găurile sunt decelerate de un câmp electric alternativ, dându-i o parte din energia

lor s Orez Distribuția intensității câmpului electric lângă suprafața semiconductorului de sub poartă la o tensiune de dren care depășește tensiunea de saturație Caracteristici statice de ieșire Natura dependențelor Ic = f(Ucvl) la ¿/zi = const pentru un tranzistor MOS cu un canal indus este similară cu natura acelorași dependențe pentru un tranzistor cu efect de câmp cu o joncțiune de control (vezi §) Subliniaritatea părților abrupte ale caracteristicilor (Fig , a) se explică printr-o scădere a grosimii canalului în apropierea drenului cu o creștere a tensiunii de scurgere și o tensiune constantă de poartă, deoarece potențialele de același semn sunt relative la sursă sunt aplicate la scurgere și la poartă În consecință, diferența de potențial dintre dren și poartă, sau dintre poartă și partea de canal adiacentă scurgerii, scade Cu alte cuvinte, datorită trecerii curentului de scurgere prin canal, se obține neechipotențialitatea canalului pe lungimea acestuia Prin urmare, odată cu creșterea curentului de scurgere, are loc o scădere a secțiunii transversale a canalului în apropierea drenului La o tensiune de saturație de t/sinas, canalul din apropierea drenului este blocat, iar o creștere suplimentară a tensiunii de dren determină o creștere foarte mică a curentului de dren Distribuția intensității câmpului electric lângă suprafața semiconductorului la o tensiune de dren care depășește tensiunea de saturație, adică pentru partea plată a caracteristicilor statice de ieșire, este prezentată în fig La o distanta \ de regiunea sursa puternic dopata predomina componenta normala a intensitatii campului electric, creata de tensiunea de poarta În această secțiune, există un strat invers lângă suprafața semiconductorului La o distanta / de regiunea puternic dopata a drenului, predomina componenta tangentiala a campului electric, creata de tensiunea la dren fata de sursa În ciuda faptului că în secțiunea canalului cu lungimea de / , componenta normală a intensității câmpului are o direcție diferită și respinge găurile de pe suprafața semiconductorului, un curent trece prin această secțiune blocată a canalului, asociat cu deplasarea orificiilor sub actiunea unui camp puternic de tragere (componenta tangentiala) Natura subliniară a dependențelor /C = f(t/CH) este cauzată și de efectul de saturație a vitezei de deriva a purtătorilor de sarcină sau de o scădere a mobilității acestora în câmpuri puternice, ca în tranzistoarele cu efect de câmp cu un control pn joncţiune Cu o creștere a tensiunii porții (conform valorii absolute valoare) caracteristicile statice de ieșire sunt deplasate în regiunea curenților de scurgere mari (vezi Fig , a), ceea ce este ușor de înțeles pe baza principiului de funcționare a unui tranzistor MIS cu canal indus La tensiuni de scurgere ridicate, poate apărea o defecțiune a tranzistorului MIS și pot exista două tipuri de defecțiuni: defalcarea joncțiunii pn sub dren și defalcarea dielectricului de sub poartă Defalcarea joncțiunii pn are de obicei un caracter de avalanșă, deoarece tranzistoarele MIS sunt de obicei realizate pe siliciu În acest caz, tensiunea de defalcare ¿/c a sondelor poate fi afectată de tensiunea de la poartă: deoarece potențialele de aceeași polaritate sunt aplicate drenului și porții unui tranzistor MIS cu un canal indus, apoi cu o creștere în tensiunea de la poartă, ¿/c de sonde va crește (vezi Fig , a) Defalcarea dielectrică sub poartă poate avea loc la o tensiune de poartă de doar câteva zeci de volți, deoarece grosimea stratului de dioxid de siliciu este de aproximativ , microni Defecțiunile sunt de obicei de natură termică, apar atunci când curentul este ciupit (vezi §) și, prin urmare, chiar și la energii scăzute ale impulsurilor de tensiune, pot apărea modificări

ireversibile ale dielectricului Acest tip de defectare poate apărea ca urmare a acumulării de sarcini statice, deoarece rezistența de intrare a tranzistoarelor MOS este mare Pentru a elimina posibilitatea acestui tip de defecțiune, intrarea tranzistorului MIS este adesea protejată de o diodă zener care limitează tensiunea de poartă Caracteristicile transmisiei statice Caracterul dependențelor /C= (¿/ H) la ¿/CH=const este clar din principiul de funcționare a unui tranzistor MIS cu canal indus Caracteristicile diferitelor tensiuni de drenare pornesc dintr-un punct de pe axa x corespunzător tensiunii de prag ¿Li porul (vezi Fig) Odată cu o creștere a tensiunii de drenaj la o tensiune de poartă constantă, curentul de drenaj crește chiar și în partea plată a caracteristicilor statice de ieșire (a se vedea Fig , a), ceea ce duce la o schimbare în sus a caracteristicilor de transmisie în coordonatele selectate sistem Interesantă și importantă din punctul de vedere al utilizării tranzistoarelor MIS este modificarea temperaturii în caracteristicile transmisiei statice Aceste modificări sunt cauzate în principal de două procese fizice În primul rând, odată cu creșterea temperaturii în intervalul de temperatură de funcționare, mobilitatea purtătorilor de sarcină scade, ceea ce duce la o scădere a curentului de scurgere În al doilea rând, există o redistribuire a purtătorilor de energie și o deplasare a nivelului Fermi la mijlocul benzii interzise (vezi §) În legătură cu o astfel de deplasare a nivelului Fermi, se formează un strat invers lângă suprafața semiconductorului la intensități mai mici ale câmpului electric (vezi Fig) Prin urmare, odată cu creșterea temperaturii, tensiunea de prag ¿/zipor scade Ca urmare, caracteristicile de transmisie statică pentru o constantă T G> "Zhlor uşor por Orez Modificarea caracteristicilor statice ale transferului și a tensiunii de prag ^pipor a tranzistorului MIS cu o modificare a temperaturii tensiunile de scurgere, dar pentru diferite temperaturi se intersectează (Fig) Astfel, modificările de temperatură ale curentului de scurgere la tensiuni constante pe tranzistorul MIS pot fi atât negative, cât și pozitive; precum şi zero la un anumit punct de funcţionare al caracteristicilor statice De obicei, efectul compensării temperaturii se obține la tensiuni de poartă care sunt puțin mai mari decât tensiunea de prag £ p p În plus, trebuie să se țină cont de faptul că abruptul caracteristicii S, care determină proprietățile de amplificare ale tranzistorului MIS, se modifică cu temperatura chiar și la un curent de drenaj constant Tranzistoare MIS cu canal încorporat Un canal conducător sub poarta unui tranzistor MIS poate fi creat ca urmare a difuziei locale sau a implantării ionice a impurităților corespunzătoare în stratul de sub suprafață al substratului Poate apărea din cauza redistribuirii impurităților lângă suprafața substratului semiconductor în procesul de oxidare termică a suprafeței acestuia În cele din urmă, un canal conductiv poate apărea sub poartă datorită unei sarcini fixe în stratul de dioxid de siliciu al porții, la niveluri de energie de suprafață și, de asemenea, datorită diferenței de potențial de contact dintre metalul de poartă și semiconductorul substratului Modularea rezistenței canalului conductor al tranzistorului MIS poate apărea atunci când tensiunea de poartă se modifică, atât polaritatea pozitivă, cât și negativă Asa de DESPRE "zi ^epuizarea La Mod t/cu sat § PARAMETRI SI PROPRIETATI ALE TRANZISTOARELOR DE CAMP CU PORTA IZOLATA Parametrul principal al tranzistorului cu efect de câmp cu o poartă izolată, care reflectă proprietățile sale de amplificare, este panta caracteristicii (vezi §) Panta de transfer de joasă frecvență corespunzătoare părții abrupte a caracteristicilor statice de ieșire poate fi determinată prin

diferențierea ( ) în raport cu tensiunea de poartă cu constanta tensiunii de dren: mor eu JÍ Hlí/cH=const £ si (,) l Pentru partea plată a caracteristicilor statice de ieșire, panta caracteristicii de transfer poate fi obținută prin diferențierea ( ) în raport cu tensiunea de poartă: S = (Ozi-Uzipor) (,) După cum se poate observa, pentru a crește abruptul caracteristicii, semiconductorul inițial trebuie să aibă o mobilitate mai mare a purtătorilor de sarcină Un tranzistor cu un canal η are o pantă caracteristică mai mare decât un tranzistor cu un canal p, deoarece mobilitatea electronilor depășește de obicei mobilitatea găurilor Panta caracteristicii va fi mai mare la tranzistoarele cu efect de câmp cu o lungime de canal mai scurtă Limita inferioară a lungimii canalului este limitată de tehnologia de fabricație De regulă, pentru fabricarea tranzistoarelor cu efect de câmp cu poartă izolată se utilizează tehnologia plană și metoda fotolitografiei, a cărei rezoluție nu permite obținerea unei lungimi de canal mai mică de - µm Panta caracteristicii poate fi mărită prin creșterea capacității specifice dintre poartă și canal Această capacitate este determinată de permisivitatea relativă și de grosimea stratului dielectric de sub poartă Utilizarea unui dielectric cu o permitivitate relativă mai mare va duce la o creștere a abruptului caracteristicii, dar în același timp vor crește și capacități parazitare între poartă și scurgere, între poartă și sursă, ceea ce va afecta negativ - asupra proprietăților de frecvență ale tranzistorului cu efect de câmp Reducerea grosimii stratului dielectric de sub poartă poate duce, de asemenea, la o scădere inacceptabilă a tensiunii de rupere a acestui strat între poartă și scurgere O creștere a lățimii canalului duce la o creștere a abruptului caracteristicii, dar în același timp la o deteriorare a proprietăților de frecvență ale tranzistorului cu efect de câmp datorită creșterii capacităților parazite Circuitul echivalent fizic al unui IGFET este similar cu circuitul echivalent fizic al unui FET de joncțiune de control (vezi Figura) Totuși, datorită faptului că poarta este izolată de semiconductor printr-un strat dielectric, rezistențele active dintre poartă și sursă, dintre poartă și dren, se dovedesc a fi foarte mari Prin urmare, ele pot fi neglijate chiar și la frecvențe relativ scăzute în comparație cu capacitățile conectate în paralel De asemenea, putem neglija rezistențele foarte mici r și rc, care sunt rezistențele diferențiale ale regiunilor puternic dopate ale semiconductorului de sub sursă și dren Viteza tranzistoarelor cu efect de câmp cu o poartă izolată este determinată de timpul de reîncărcare a capacității distribuite între poartă și canal Constantele de timp ale procesului de reîncărcare a acestei capacități cu o rezistență externă scăzută în circuitul de poartă limitează intervalul de frecvență de funcționare al unui tranzistor cu efect de câmp de poartă izolat la frecvențe de aproximativ GHz, adică, în principiu, astfel de tranzistori pot funcționa aproximativ până la aceleași frecvențe ca și tranzistoarele bipolare Caracteristica principală a tranzistoarelor cu efect de câmp este o rezistență de intrare foarte mare Componenta activă a acestei rezistențe poate atinge IO Ohm Prin urmare, tranzistoarele cu efect de câmp sunt utilizate în circuite care au și rezistențe mari § SEMICONDUCTOR DISPOZITIVE CUPLATE LA ÎNCĂRCARE Structura și principiul de funcționare a dispozitivelor cuplate la sarcină Luați în considerare principiul de funcționare al unui CCD folosind exemplul unui circuit de registru cu deplasare în trei cicluri, care poate fi reprezentat ca o structură a unui tranzistor MIS cu multe porți (Fig , a) Acest dispozitiv este format din trei secțiuni Prima, secțiunea de intrare,

include o sursă cu o regiune p+ sub ea și o poartă de intrare care acționează ca o cheie pentru controlul mișcării găurilor din regiunea de difuzie p+ a sursei la primul puț de potențial A doua, secțiunea de transfer, constă dintr-o serie de porți care controlează potențialul la interfața siliciu-dioxid de siliciu Aceste porți sunt interconectate prin două Tensiunile de la porțile secțiunii de transfer au forma unor impulsuri de diferite amplitudini, care se înlocuiesc între ele într-o permutare ciclică (Fig , b e) Cu o astfel de schimbare a tensiunii la poartă Orez Structura unui CCD cu o sursă de alimentare în trei cicluri la porțile secțiunii de transfer (a) și o explicație a principiului său de funcționare (b, c, d, e): b - scrierea unei unități logice prin injectarea unui pachet de găuri în puțul de potențial de sub prima poartă a secțiunii de transfer; c - transferul unei încărcături de informație - un pachet de găuri în puțurile de potențial ulterioare atunci când potențialele de pe electrozii de poartă se modifică; d - citirea unei unități logice la ieșirea dispozitivului în timpul extragerii găurilor din puțul de potențial în regiunea p+ a drenului; e - înregistrarea unui zero logic în absenţa unui potenţial negativ la poarta de intrare * puțurile de potențial pax se deplasează la ieșirea dispozitivului, purtând cu ele pachete de purtători de încărcare - găuri A treia - secțiunea de ieșire - include o joncțiune p-p a drenului Această tranziție este deplasată în direcția opusă și este concepută pentru a extrage găurile din puțurile potențiale potrivite pentru aceasta (Fig , d) Lăsați tensiunea Í BX să fie aplicată porții de intrare la ciclul inițial de funcționare, suficientă pentru a forma un canal conductor sub poarta de intrare (|Í/BXI > I Unop |) Dacă, în același timp, există o tensiune negativă suficient de mare pe prima poartă a secțiunii de transfer, adică dacă există un put de potențial adânc pentru găuri sub prima poartă a secțiunii de transfer, atunci găurile vor părăsi sursa , trec prin canalul de sub poarta de intrare și se acumulează în puțul de potențial de sub prima poartă a secțiunii de transfer (Fig) Tensiunea de la poarta de intrare Í/BX este eliminată la începutul următorului ciclu de schimbare a tensiunilor la porțile secțiunii de transfer Prin urmare, canalul conductor de sub poarta de intrare dispare Așa se înregistrează informații (de exemplu, o unitate logică), care corespunde unei anumite încărcături de găuri Q "i" acumulate în puțul de potențial de sub prima poartă ca urmare a injectării din sursă Rețineți că pentru a scrie informații corespunzătoare unui zero logic, nu trebuie aplicată o tensiune negativă la poarta de intrare În acest caz, nu va exista nicio injecție de găuri din regiunea sursă p+ în puțul de potențial de sub prima poartă (Fig , e) și doar o sarcină de găuri relativ mică Q , asociată fie cu generarea termică a purtători de încărcare, sau cu golirea incompletă a puțului potențial în ciclurile anterioare ale dispozitivului După modificarea tensiunilor de pe porțile secțiunii de transfer, tensiunea cea mai negativă va fi pe cea de-a doua poartă, astfel încât pachetul de găuri se va deplasa la puțul de potențial de sub cea de-a doua poartă a secțiunii de transfer (Fig , c) Odată cu următoarele cicluri de schimbare a tensiunii la porțile secțiunii de transfer, pachetul de găuri se va deplasa mai departe spre secțiunea de ieșire (Fig , d, e) Dacă nu există purtători de sarcină - găuri în puțurile de potențial potrivite pentru joncțiunea pn a drenului, atunci nu va exista nicio modificare a curentului în circuitul de scurgere Și numai în cazul în care găurile care conțin puțul potențial se apropie de joncțiunea pn a drenului, aceste găuri vor fi extrase și un impuls de curent va trece în circuitul de drenaj sau tensiunea de dren se va

modifica (Fig , d) Parametrii CCD-urilor Trebuie remarcat faptul că CCD-ul este un dispozitiv în mod tipic dinamic și are limite inferioare și superioare ale frecvențelor de ceas ale impulsurilor de tensiune care alimentează secțiunea de transfer Limita inferioară a frecvenței de ceas este determinată de faptul că între puțul de potențial din apropierea suprafeței și restul volumului semiconductorului trec curenți, asociați cu generarea termică a purtătorilor de sarcină și, în principiu, nu diferă de curentul de extracție inversă prin joncțiune pn Acești curenți afectează nivelul zero logic, crescând încărcarea găurilor din puțurile de potențial goale În funcție de temperatura și proprietățile semiconductorului, se poate produce o acumulare apreciabilă de găuri în puțurile de potențial goale în timpi variind de la sutimi la câteva secunde Prin urmare, limita inferioară a frecvenței ceasului CCD este de obicei unități - zeci de kiloherți Limita superioară a frecvenței de ceas este determinată de timpul fluxului de încărcare de la un puț de potențial la altul (de ordinul a câteva nanosecunde) Într-un timp mai scurt, întreaga încărcare nu are timp să treacă de la un potenţial puţ în altul Prin urmare, limita superioară a frecvențelor de ceas pentru CCD-uri este de obicei determinată de zeci de megaherți În intervalul de frecvențe de operare care sunt departe de limită, CCD-ul nu transferă complet încărcătura informațională de la un put potențial la altul Acest lucru se datorează fenomenelor de captare a purtătorilor de sarcină prin nivelurile de energie de suprafață ale capcanelor de captare Ca rezultat, în primul rând, sarcina totală a pachetului transmis de găuri scade, adică nivelul unității logice scade În al doilea rând, purtătorii de sarcină capturați de capcanele de captare și eliberați după ceva timp pot cădea în puțuri potențiale goale, distorsionând astfel nivelul zero logic Pentru a reduce influența acestui efect, este necesar să ne asigurăm că densitatea stărilor de suprafață este cu aproximativ două ordine de mărime mai mică decât cea permisă în producția de tranzistoare MIS O altă metodă, mai simplă, de a trata efectul considerat este de a codifica zeroul logic nu prin absența sarcinii în puțul potențial, ci printr-o sarcină mică Această încărcare, în timp ce se deplasează prin secțiunea de transport a CCD, duce la umplerea majorității stărilor de suprafață, care nu mai pot capta purtătorii de sarcină atunci când trec prin pachetul de orificii În acest caz, totuși, amplitudinea semnalului la ieșirea CCD scade A treia metodă de abordare a fenomenului de captură este utilizarea așa-numitului canal profund În acest caz, prin introducerea de impurități corespunzătoare în stratul de suprafață al semiconductorului, se creează o astfel de distribuție a câmpului electric în apropierea suprafeței în care purtătorii de sarcină se deplasează fără aproape de suprafață, dar la o anumită adâncime (până la câțiva micrometri) Acest lucru reduce dramatic pierderile de captură media În plus, în CCD-urile cu un canal adânc, este posibilă deplasarea limitei superioare a frecvențelor de operare cu cel puțin MHz Cu toate acestea, dispozitivele cu un canal profund au o eficiență semnificativ mai mică de control al porții și, în consecință, o taxă de informare mai mică în comparație cu CCD-urile convenționale Pentru a evalua efectul considerat al captării purtătorului într-un CCD, se utilizează parametrul de eficiență a transferului de sarcină η = (Φ - Q)i + i / (Q "i> - Q" o) ó, arătând ce fracțiunea de sarcină este transferată dintr-un puț de potențial i în altul Zj- Valoarea eficienței de transmisie η este de obicei apropiată de , deci este mai convenabil să se utilizeze factorul de pierdere (ineficiența transmisiei) $K_п$= - η Pentru CCD-uri bune, factorul de pierdere este mai mic decât IO-

Dependența de frecvență a factorului de pierdere este prezentată în orez Scăderea factorului de pierdere Kp în domeniul de frecvență joasă este determinată de scăderea influenței curenților inversi între puțul de potențial și restul semiconductorului (substratului) Creșterea factorului de pierdere la frecvențe înalte este asociată cu transferul incomplet de sarcină de la un puț de potențial la altul din cauza schimbării rapide a impulsurilor de ceas de pe porți Valoarea finală a factorului de pierdere în domeniul de frecvență medie este determinată de efectul captării purtătorilor de sarcină Orez Dependența de frecvență a factorului de pierdere CCD capcane de captare După cum se poate vedea, taxa de informare este inevitabil pierdută în CCD Pentru a elimina acest dezavantaj, se folosesc circuite de regenerare, care sunt în esență amplificatoare Semnalul citit de la CCD este amplificat cu formarea corespunzătoare a nivelurilor sale, iar apoi informația este scrisă în lanțul CCD Pentru stocarea pe termen lung a informațiilor, lanțurile CCD sunt închise într-un inel Regenerarea încărcăturii informaționale poate fi combinată cu ieșirea de informații - apoi se obține un dispozitiv cu citire nedistructivă a informațiilor Prin electrozii de control ai obloanelor CCD practic nu exista trece curentul de conducere, deoarece porțile sunt izolate de semiconductor (substrat) printr-un strat de dielectric bun - dioxid de siliciu Dar în circuitul de electrozi al secțiunii de transfer, o oarecare putere este încă consumată pentru a transfera încărcătura de informații Această putere este proporțională cu frecvența ceasului În ceea ce privește designul și tehnologia, CCD-urile diferă de alte dispozitive prin faptul că au un număr mic de regiuni de difuzie și contacte metal-semiconductor, adică un număr mic de elemente structurale potențial nesigure Acest lucru duce la un randament ridicat de dispozitive adecvate în fabricarea CCD-urilor, la costul scăzut și la fiabilitatea ridicată a acestora Utilizarea dispozitivelor cuplate la încărcare Până în prezent, au fost identificate trei domenii principale de utilizare a CCD-urilor:) dispozitive de stocare pentru calculatoare electronice;) dispozitive pentru conversia imaginilor în semnale electrice;) dispozitive analogice de procesare a informațiilor Dispozitive de stocare pe computer Conform principiului de funcționare, CCD-urile sunt dispozitive de stocare precum liniile de întârziere Dispozitivele de memorie bazate pe CCD au fost aduse în producția industrială, deoarece se potrivesc cel mai bine naturii CCD-urilor - registre de deplasare cu intrare și ieșire secvențială a informațiilor Informațiile circulă continuu într-un astfel de dispozitiv de memorie CCD cu regenerare La accesarea dispozitivului de stocare, informațiile înregistrate sunt eșantionate cu sau fără regenerare, adică cu citire nedistructivă sau cu distrugerea informațiilor înregistrate Adesea, în modul de stocare, informațiile circulă prin dispozitiv relativ lent la o frecvență de ceas de ordinul a zece kiloherți, pentru a asigura doar regenerarea și pentru a nu cheltui multă putere pe transferul de informație încărcat La accesarea dispozitivului de stocare, frecvența ceasului crește la limită - aproximativ câțiva megaherți, ceea ce asigură eșantionarea rapidă a informațiilor înregistrate Dispozitive pentru conversia imaginilor în semnale electrice Principiul de funcționare a unor astfel de dispozitive se bazează pe faptul că, atunci când un CCD este iluminat într-un semiconductor, se formează perechi de purtători de sarcină electroni-gaură în apropierea suprafeței sale, care sunt separate de câmpul electric al puțului de potențial de sub poarta lui secțiunea de transfer Purtătorii formați în timpul absorbției cuantelor de lumină umplu puțurile de potențial proporțional cu iluminarea unei

anumite regiuni a CCD Dacă atunci informațiile de lumină înregistrate sunt deplasate în mod obișnuit, atunci semnalul de la ieșirea CCD va repeta distribuția de iluminare, adică o linie de imagine va fi evidențiată Se poate evidenția și următoarea linie și așa mai departe În prezent au fost create camere de transmisie CCD care ating standardul obișnuit de televiziune în ceea ce privește rezoluția, inclusiv pentru televiziunea color Dispozitive pentru procesarea informațiilor analogice CCD-urile pot stoca și semnale analogice, dar în acest caz devine imposibilă regenerarea informaţiei înregistrate Cu toate acestea, memorarea simplă deschide posibilități mari de utilizare a CCD-urilor, deoarece aceste dispozitive vă permit să reglați întârzierea transferului de informații Cea mai simplă opțiune pentru utilizarea CCD-urilor pentru procesarea informațiilor analogice s-a dovedit a fi linii de întârziere fixe pentru receptoarele de televiziune color § VARIITATE DE DISPOZITIVE CHARGE-cuplat Principiul de funcționare al CCD-urilor a fost discutat în § folosind exemplul unui CCD cu o sursă de alimentare în trei cicluri la porțile secțiunii de transfer Designul unui astfel de dispozitiv are mai multe dezavantaje:) electrozii metalici - porți - trebuie amplasați la o distanță foarte mică unul de celălalt (aproximativ - microni), ceea ce îngreunează fabricarea lor;) la o distanță mică între porți, un strat subțire de dioxid de siliciu situat între electrozi poate fi contaminat cu impurități din atmosferă;) intersecțiile inamovibile ale liniilor de metalizare pentru conectarea porților între ele complică tehnologia Aceste deficiențe pot fi parțial eliminate în alte modele de dispozitive similare Orez Structura secțiunii de transfer a unui CCD cu un dielectric în trepte (a) și o explicație a principiului transferului de sarcină a informațiilor cu o alimentare push-pull a porților secțiunii de transfer (b, c) Dispozitive cuplate cu încărcare Push-Pull Structura unui CCD push-pull sau CCD cu un dielectric în trepte se distinge prin alternarea regiunilor semiconductoare (siliciu) cu straturi groase și subțiri de dioxid de siliciu (Fig , a) Electrodul fiecărei porți a secțiunii de transfer este situat pe suprafața unor straturi groase și subțiri de dioxid de siliciu Când se aplică o tensiune pe poartă, sub ea se obține automat un puț de potențial asimetric , a cărui configurație asigură mișcarea direcționată a pachetului purtător de sarcină către dren (Fig , b, c) Este clar că circuitul de control al secțiunii de transfer a unui astfel de CCD este mult mai simplu decât cel al unui CCD în trei timpi Conectarea obloanelor între ele în CCD-uri push-pull se poate realiza fără intersecții ale liniilor de metalizare, ceea ce simplifică tehnologia de fabricație a unor astfel de dispozitive CCD cu un număr de obturatoare ascunse (cu metalizare în două straturi) În structura secțiunii de transfer a unui astfel de dispozitiv, unele dintre porți sunt realizate din siliciu policristalin (sau dintr-un metal refractar, cum ar fi molibdenul) În golurile dintre porțile de siliciu de pe suprafața stratului de dioxid de siliciu sunt porți metalice (Fig), care sunt separate de porțile de siliciu policristalin printr-un strat de dioxid de siliciu depus după crearea porților de siliciu policristalin Într-o astfel de structură este posibil Si policristal Orez Structura unei secțiuni de transfer CCD cu un număr de porți de polisiliciu ascunse scurtează distanța între electrozii de poartă la o valoare egală cu grosimea stratului dioxid de siliciu CCD pe lanțuri de tranzistoare MIS Structura secțiunii de transfer a unor astfel de CCD-uri este un lanț de tranzistoare MOS cu circuite de control push-pull (Fig , a) Regiuni de difuzie cu conductivitate electrică Unop' -) + +

Chv + + + + + Orez Structura secțiunii de transfer CCD pe lanțuri de tranzistoare MOS (a) și distribuția potențialului de suprafață în modul de transfer de sarcină a informațiilor (b, c) de tip p, care sunt drenajul pentru unul și sursa pentru alt tranzistor MIS, nu sunt conectate la o sursă de alimentare, spre deosebire de tranzistoarele MIS convenționale O sarcină de informație sub forma unui pachet de găuri poate fi stocată în regiuni de difuzie cu conductivitate electrică de tip p, deoarece bariera potențială a joncțiunii p-n dintre regiunea de difuzie și substrat previne răspândirea găurilor în modul de stocare, în ciuda I , în ciuda unei prejudicii directe a acestei tranziții din cauza încărcării pozitive a unui pachet de găuri în regiunea p de difuzie (Fig , b) În modul de transmitere a informațiilor (un pachet de găuri), fiecare a doua poartă primește un impuls de polaritate negativă, a cărui amplitudine este mai mare decât valoarea lui Í nop Din acest motiv, sub fiecare al doilea oblon rom în semiconductor există un canal Datorită asimetriei locației electrodului metalic în raport cu regiunile de difuzie, fiecare a doua regiune de difuzie se află sub un potențial negativ mare, ceea ce asigură mișcarea direcționată a găurilor de la o regiune de difuzie la alta, adică la un puț de potențial mai adânc (Fig , a) Astfel, principiul de funcționare a CCD-urilor pe lanțuri de tranzistoare MIS este similar cu principiul de funcționare a CCD-urilor din alte modele și structuri care au fost luate în considerare mai devreme Diferența dintre CCD-urile de pe lanțurile de tranzistoare MIS și alte CCD-uri este că structura secțiunilor lor de transfer conține un număr destul de mare de joncțiuni pn, ceea ce o face mai puțin perfectă din punct de vedere tehnologic Tranzistor de încărcare de suprafață iese în evidență față de prietenul cu siliciu și din substrat Si policristal Orez Structura unui tranzistor cu sarcină de suprafață atunci când se stochează o sarcină de informație sub primul electrod Cea mai simplă structură a unui tranzistor cu sarcină de suprafață cu un co-substrat și trei electrozi izolați unul de celălalt (Fig) Primul și al treilea electrod pot fi ascunși De obicei, sunt fabricate din siliciu policristalin sau un metal refractar (de exemplu, molibden) Când se aplică un potențial negativ la primul sau al treilea electrod, se formează un puț de potențial în semiconductor sub electrodul corespunzător pentru purtătorii minoritari - găuri Informațiile sub forma unui pachet de găuri pot fi introduse în acest put de potențial prin iluminare Astfel, primul și al treilea electrod, împreună cu zonele semiconductorului de sub acești electrozi, pot îndeplini funcțiile de recepție și stocare a unei sarcini de informație Al doilea electrod acționează ca o poartă - atunci când i se aplică un potențial negativ, se formează un canal care conectează puțurile de potențial de sub primul și al treilea electrod În acest caz, sarcina informațională poate curge de la puțul de potențial, de exemplu, sub primul electrod către puțul de potențial de sub al treilea electrod, dacă potențialul celui de-al treilea electrod este mai negativ Ca și în cazul CCD-urilor cu alte modele, în modul static de funcționare al unui tranzistor cu sarcină de suprafață, o sarcină parazită se acumulează într-un puț de potențial gol datorită generării termice a purtătorilor de sarcină, adică un astfel de dispozitiv nu poate funcționa într-un mod static zzo Întrebări de control capitol circuite integrate § OBIECTIVE ŞI PRINCIPII ALE MICROELECTRONICII Prima sarcină a microelectronicii este de a crea cele mai fiabile circuite și dispozitive electronice Această problemă este rezolvată în principal prin utilizarea unor principii noi calitativ pentru fabricarea echipamentelor electronice, adică prin refuzul de a

folosi elemente discrete ale echipamentelor electronice și prin crearea de circuite integrate în care se formează elemente active (tranzistoare, diode), elemente pasive (rezistoare, condensatoare) și elementele de conectare ale unui circuit electronic are loc pe suprafața sau în volumul unui cristal semiconductor sau pe suprafața unui substrat dielectric într-un singur ciclu tehnologic Numărul minim de conexiuni în circuit face posibilă creșterea dramatică a fiabilității echipamentelor microelectronice Tocmai acesta este ceea ce depășește contradicțiile complexe dintre cerințele crescute pentru fiabilitatea echipamentelor electronice și complicația rapidă a acestuia A doua sarcină a microelectronicii este reducerea costurilor circuitelor și dispozitivelor electronice Această problemă este rezolvată prin formarea unor structuri de diferite elemente, conexiuni interelementale și plăci de contact pentru multe circuite integrate pe o placă semiconductoare relativ mare sau pe un substrat dielectric într-un singur ciclu tehnologic, urmată de împărțirea în cristale sau, respectiv, plăci de circuite integrate Procedând astfel, este posibil să excludeți eliminați multe operațiuni tehnologice iraționale, reduceți numărul de conexiuni în circuit, excludeți etanșarea separată a elementelor individuale și reduceți semnificativ numărul de operațiuni de asamblare care sunt necesare pentru fabricarea elementelor discrete și asamblarea lor într-un circuit Aceste avantaje ale circuitelor integrate devin mai semnificative pe măsură ce devin mai complexe și numărul de elemente din ele crește Odată cu soluționarea acestor două cele mai importante probleme ale microelectronicii, crearea și utilizarea circuitelor integrate duce la o scădere bruscă a masei și volumului echipamentelor electronice în comparație cu masa și volumul echipamentelor bazate pe elemente discrete, precum și la o scădere a consumului de energie O reducere suplimentară a masei și volumului circuitelor integrate este considerată o sarcină de importanță secundară Densitatea de ambalare a unui circuit integrat este raportul dintre numărul de elemente ale unui circuit integrat și volumul unui circuit integrat fără a lua în considerare volumul de pini Un alt parametru care caracterizează gradul de complexitate al unui circuit integrat sau numărul de elemente conținute în acesta este gradul de integrare Dacă un circuit integrat conține până la elemente inclusiv, atunci se numește circuit integrat de gradul I de integrare; peste până la de elemente - al doilea grad de integrare; peste până la de elemente - al treilea grad de integrare etc Un circuit integrat care conține de elemente sau mai multe fabricate folosind tehnologia bipolară sau de elemente sau mai multe fabricate folosind tehnologia MIS, se numește circuit integrat mare (LSI) § CLASIFICAREA MICROCIRCUITULUI INTEGRAT Circuitele integrate sunt clasificate în funcție de tehnologia de fabricație, scopul funcțional și alte caracteristici După design și caracteristicile tehnologice, se disting circuitele integrate semiconductoare și hibride Principalele elemente active ale circuitelor integrate semiconductoare pot fi fie tranzistoarele bipolare, fie tranzistoarele cu efect de câmp, care sunt de obicei utilizate yut tranzistoare MIS cu un canal indus Prin urmare, se disting circuitele integrate bipolare și MIS Elementele unui circuit integrat bipolar trebuie izolate unele de altele pentru a preveni interacțiunea parazită Metodele de izolare sunt discutate în § Datorită particularităților tranzistoarelor MIS, elementele MIS ale circuitelor integrate nu au nevoie de izolare specială unele de altele Conexiunile elementelor individuale între ele, necesare pentru funcționarea circuitului, sunt efectuate folosind subțiri Orez Variante ale

structurilor circuitelor integrate semiconductoare cu execuție diferită a elementelor pasive (a, b) și circuitul echivalent al acestor structuri (c) benzi metalice depuse pe suprafata oxidata a cristalului Exemple de structuri de circuite integrate bipolare sunt prezentate în fig Un exemplu de MIS al unui circuit integrat este dispozitivul cuplat la sarcină discutat în § O parte a unui circuit integrat hibrid care poate fi izolată ca produs independent este numită componentă a circuitului integrat (spre deosebire de un element care este parte integrantă a circuitului integrat semiconductor sau a substratului de circuit integrat hibrid) Compoziția circuitului integrat hibrid pot fi incluse ca componente nu numai tranzistoare sau diode, ci și circuite integrate semiconductoare întregi Elementele pasive ale circuitelor integrate hibride sunt de obicei fabricate pe substraturi sital, ceramice sau din sticlă prin aplicarea diferitelor filme dielectrice, rezistive și metalice Pe același substrat efectuați conexiuni între elemente și intercomponente, precum și conexiuni zonele de tact Un exemplu de circuit integrat hibrid este prezentat în fig Proiectarea și fabricarea circuitelor integrate hibride este adecvată pentru rezolvarea unor probleme speciale, private Figura Structura unui circuit integrat hibrid, al cărui circuit echivalent este prezentat în fig , c cabane cu un număr relativ mic de produse necesare Proiectarea rezistențelor de film și a condensatoarelor pe un substrat dielectric poate fi realizată rapid, iar fabricarea acestor elemente nu necesită echipamente costisitoare Dacă circuitul integrat hibrid constă din nu câte circuite integrate semiconductoare, atunci caracteristica sa distinctivă poate fi, dimpotrivă, multifuncționalitatea Producția unor astfel de circuite integrate hibride trebuie să fie produsă în serie După scopul funcțional, toate circuitele integrate sunt de obicei împărțite în analog și digital Circuitele analogice în general și circuitele integrate analogice în special se bazează pe cele mai simple etape de amplificare Folosind multe etape, ei creează diverse amplificatoare, stabilizatoare de tensiune și curent, convertoare de frecvență, faze, durate, generatoare de semnale sinusoidale, dreptunghiulare și de altă natură, precum și alte circuite Circuitele integrate digitale se bazează pe comutatoare cu tranzistori care pot fi în două stări stabile: deschis și închis Utilizarea comutatoarelor cu tranzistori face posibilă crearea diverselor circuite logice, declanșatoare și alte circuite integrate Circuitele integrate digitale sunt utilizate în dispozitivele de procesare discretă informații despre calculatoare electronice (calculatoare), sisteme de automatizare etc § METODE DE IZOLARE ELEMENTE DE MICROCIRCUIT INTEGRAT Toate elementele circuitelor integrate semiconductoare și componentele circuitelor integrate hibride, realizate în volumul unui cristal, trebuie izolate unele de altele pentru a exclude interacțiunea parazită dintre ele Excepție fac tranzistorii MOS, așa cum sa menționat deja Pentru a separa elementele individuale, izolarea lor este utilizată cu o joncțiune p-n polarizată invers și uneori cu izolație dielectrică Izolarea elementelor prin tranziție electron-gaură Principiul unei astfel de izolare este că pentru fiecare element din cristal se formează propria sa așa-numită insulă, înconjurată de o joncțiune pn, care este deplasată în direcția opusă în timpul funcționării microcircuitului Curentul de scurgere al unei astfel de izolații nu depășește de obicei IO- A O tranziție electron-gaură care izolează elementele individuale polițiștii unui circuit integrat semiconductor unul de celălalt pot fi create în diferite moduri, dintre care mai mult de o duzină au fost dezvoltate în prezent Luați în considerare cele mai

comune dintre ele - epitaxială plană cu difuzie de separare (vezi Fig) În primul rând, un strat epitaxial este crescut pe o placă de siliciu cu o conductivitate electrică de tip opus tipului de conductivitate electrică a majorității semiconductorului, adică se creează o joncțiune epitaxială pn pe întreaga zonă a plachetei de siliciu Apoi, sunt efectuate etapele obișnuite ale tehnologiei plane: oxidarea suprafeței filmului epitaxial, depunerea unui fotorezist, iluminarea acestuia printr-o mască - o fotomască, deschiderea ferestrelor în dioxid de cremă Na(B) I SHI° C A) Si p-tip π-muna (stratul epitaxial) Orez Formarea de insule cu conductivitate electrică de tip n pe un substrat de siliciu monocristal cu conductivitate electrică de tip p prin metoda epitaxială plană cu difuzie de separare niya, difuzia locală a acceptorilor prin întregul strat epitaxial către substratul cu conductivitate electrică de tip p (Fig , a) În insulele rezultate cu conductivitate electrică de tip n (Fig , b), structurile tranzistoarelor se formează ulterior sau alte dispozitive semiconductoare Pentru a îmbunătăți unele parametrii și caracteristicile tranzistoarelor înainte de creștere Difuzia locală suplimentară a impurității donor poate fi realizată prin intermediul stratului epitaxial de către planar- tehnologie pentru a crea straturi dopate ascunse (p+-straturi) Ca urmare, sub colectorul viitorului tranzistor apare o regiune bine conducătoare, ceea ce duce la o îmbunătățire a caracteristicilor tranzistoarelor Izolație dielectrică Metoda de izolare dielectrică are, de asemenea, multe opțiuni Luați în considerare metoda de izolare a elementelor cu dioxid de siliciu Pe fig prezintă secvența operațiilor atunci când se utilizează această metodă: oxidarea unei plăci de siliciu monocristal (Fig , , a); fotolitografie; gravarea canelurilor în siliciu prin ferestre deschise în dioxid de siliciu - adâncimea canelurilor este de aproximativ microni (Fig , b); reoxidarea siliciului la temperatură ridicată sau aplicarea dioxidului de siliciu în alt mod - grosimea stratului de dioxid este de aproximativ micron (Fig , a); creșterea siliciului policristalin cu o grosime de microni pe un strat de dioxid de siliciu prin, de exemplu, descompunerea pirolitică a silanului (Fig , d); măcinarea sau gravarea din partea opusă a siliciului monocristal până când insulele se separă (Fig , e) Metoda de izolare dielectrică asigură o izolare bună atât pentru curent continuu, cât și pentru curent alternativ, deoarece capacitatea asociată cu stratul de oxid poate fi foarte mică (pF/mm pentru un strat de dioxid de µm grosime) Tensiunea de avarie pentru izolația dielectrică este mult mai mare în comparație cu tensiunea de defalcare pentru izolația p-n-joncțiune (peste V) A) Si n-muna ^Sio Orez Secvența principalelor etape tehnologice ale formării insulelor de siliciu monocristalin pe un substrat de siliciu policristalin prin metoda izolației dielectrice: a - oxidarea siliciului monocristal; b - gravarea canelurilor dintr-o plachetă de siliciu prin ferestre într-un strat de dioxid de siliciu; c - reoxidarea siliciului; d - formarea de siliciu policristalin; e - măcinarea siliciului monocristal înainte de separarea insulelor Principalul dezavantaj al acestei metode de izolare este costul ei ridicat comparativ cu cel planar-epitaxial § ELEMENTE ACTIVE Ca elemente active ale circuitelor integrate, se folosesc de obicei diverse structuri de tranzistori, formate în cristale de siliciu prin tehnologie plană Tranzistoarele circuitelor integrate pot diferi nu numai în structură, ci și în principiul de funcționare tranzistor bipolar Orez Structura unui tranzistor bipolar cu un strat p + ascuns (a) și topologia electrozilor acestui tranzistor (b) Tranzistorul bipolar este un element activ comun în circuitele integrate moderne

Structura unui tranzistor bipolar în circuite integrate (tranzistor integrat) diferă de structura unui tranzistor discret izolat de substrat O altă caracteristică este legată de faptul că ieșirea din regiunea colector a tranzistorului integrat este realizată pe suprafața superioară a cristalului Prin urmare, pentru a reduce rezistența de volum a regiunii colectoare, înainte de creșterea epitaxială, substratul este de obicei subdopat în acele locuri în care se vor forma structuri de tranzistori, adică se creează un strat n+ ascuns (Fig) Cu toate acestea, chiar și în prezența unui strat n+ ascuns, rezistența regiunii colectoare a unui tranzistor integrat se dovedește a fi mai mare decât cea a unui tranzistor discret, deoarece stratul n+ ascuns este separat de electrod colector cu un strat de înaltă rezistență al regiunii colectoare Acest lucru duce la o oarecare deteriorare a proprietăților de frecvență ale tranzistorului integrat datorită creșterii constantei timpul circuitului colector (timp de reîncărcare a capacităţii de barieră a colectorului) Prin urmare, frecvențele de tăiere [gr de tranzistoare bipolare din circuitele integrate nu depășesc de obicei MHz De asemenea, trebuie luat în considerare faptul că capacitatea de ieșire a tranzistorului integrat constă nu numai din capacitatea de barieră a joncțiunii colectorului, ci și din capacitatea de barieră a joncțiunii izolatoare dintre regiunea colector a tranzistorului integrat și restul cristal W Al St № " F St p-tip δ) Orez Structura tranzistorului orizontal p-p-p-tip-pa (a) și topologia acestui tranzistor (b) În plus, datorită rezistenței crescute a regiunii colectorului, tranzistorul integrat are o valoare crescută a tensiunii între colector și emițător în modul de saturație Un tranzistor integrat diferă de un tranzistor discret similar fabricat folosind aceeași tehnologie plană într-o dimensiune mult mai mică Acest lucru se explică prin faptul că într-un tranzistor planar discret trebuie să existe plăci de contact pentru conectarea cablurilor emițătorului, bazei și colectorului Dimensiunea tampoanelor trebuie să fie de cel puțin X µm Într-un circuit integrat, plăcuțele sunt necesare doar pentru a conecta cablurile de la întregul circuit Elementele separate ale circuitului integrat sunt interconectate prin conexiuni între elemente sub formă de benzi metalice subțiri și înguste (mai mulți micrometri) Circuitele integrate bipolare se bazează pe tranzistoare de tip npn, care este cauzată de comoditatea formării structurilor p-p-p și a parametrilor puțin mai buni ai tranzistorilor p-p-p integrati în comparație cu parametrii tranzistorilor integrati de tip p-p-p Faptul este că pentru formarea regiunilor emițătoare puternic dopate ale tranzistoarelor de tip n-p-n difuzia utilizată în mod obișnuit este fosforul, care are o solubilitate ridicată în siliciu și un coeficient de difuzie relativ mic Astfel, pentru a forma un tranzistor p-p-p într-un circuit integrat care conține tranzistori p-p, este, de asemenea, necesar să se efectueze o difuzie suplimentară a unui acceptor cu o solubilitate limită care depășește solubilitatea limită a fosforului Și astfel de acceptori sunt practic absenți Prin urmare, principala opțiune acceptabilă pentru un tranzistor integrat de tip pnp este așa-numitul tranzistor orizontal sau lateral (Fig) Pentru formarea sa, nu este necesar să se introducă operații tehnologice suplimentare, deoarece regiunile p ale emițătorului și colectorului său sunt obținute simultan la crearea regiunii p a bazei unui tranzistor de tip npn Cu toate acestea, tranzistorul orizontal p-n-p se dovedește a fi lipsit de derive datorită dopării uniforme a regiunii sale de bază, stratul epitaxial Grosimea părții active a bazei orizontalei tranzistorul se dovedește a fi relativ mare Toate acestea conduc la

proprietăți de frecvență mediocre ale unui tranzistor orizontal: frecvența de tăiere a acestuia nu depășește, de obicei, câteva zeci de megaherți Din structura unui tranzistor orizontal (Fig) este clar că pentru a obține un emițător sau un coeficient de transfer de curent de bază mai mare, este necesar ca aria părții inferioare a regiunii emițătorului să fie mică în comparație cu zona părților laterale ale acestei regiuni Aceasta înseamnă că regiunea emițătorului trebuie să fie cât mai îngustă posibil (lățimea ferestrei în stratul de dioxid de siliciu pentru difuzia acceptoarelor ar trebui să fie de µm) Un tranzistor orizontal trebuie să aibă aceleași tensiuni de defalcare ale joncțiunilor emițătorului și colectorului Coeficienții de transfer al curentului emițătorului ar trebui să fie, de asemenea, apropiați în timpul pornirii normale și inverse a unui astfel de tranzistor, deoarece regiunile emițătorului și colectorului au proprietăți identice Structura orizontală facilitează implementarea unui tranzistor multi-colector Pentru a face acest lucru, este suficient să împărțiți zona inelară a colectorului în mai multe părți și să furnizați cabluri separate din fiecare parte - de la fiecare colector Coeficientul de transfer de curent pentru fiecare colector va fi, desigur, de un număr corespunzător de ori mai mic decât pentru un singur colector, dar toți colectorii vor acționa "sincron", iar sarcinile din toate circuitele colectoarelor vor fi separate electric Tranzistorul multicolector se dovedește convenabil pentru unele circuite integrate digitale Tranzistor bipolar cu diodă Schottky Tranzistorul bipolar din circuitele integrate digitale acționează de obicei ca un comutator și funcționează fie în modul de saturație, fie în modul de întrerupere tot timpul În modul de saturație, există o acumulare de purtători minoritari de sarcină în baza tranzistorului, precum și în regiunea colectorului (vezi §) Procesele de acumulare a purtătorilor minoritari și resorbția lor ulterioară atunci când tranzistorul este comutat în modul de întrerupere sau în starea oprit sunt asociate cu un proces relativ lent de difuzare a purtătorilor de sarcină minoritar Inerția acestor procese determină viteza de comutare a tranzistorului din starea pornit în starea oprită și invers, adică viteza circuitului Pentru a accelera procesul de acumulare și resorbție a purtătorilor de sarcină minoritari, este recomandabil să se limiteze acumularea acestora Acest lucru poate fi realizat prin derivarea joncțiunii colectoare a tranzistorului cu o diodă Schottky, adică o diodă cu o joncțiune electrică redresoare între metal și semiconductor (vezi §) Structura unui astfel de tranzistor integrat și circuitul său echivalent sunt prezentate în fig Electrodul de aluminiu formează o joncțiune ohmică cu regiunea p a bazei, iar tranziția dintre electrodul de aluminiu și regiunea /p de rezistență relativ mare a colectorului se dovedește a fi rectificatoare Din cauza inegalității funcțiilor de lucru ale electronilor din aluminiu și siliciu cu conductivitate electrică de tip /î și ca urmare a tratamentului chimic al suprafeței cristalului de siliciu, apare o barieră de potențial cu o înălțime de aproximativ , eV contactul pentru electroni (Fig , a), care este oarecum mai mic Orez Structura unui tranzistor cu o diodă Schottky (a) și circuitul său echivalent (b) Orez Diagrama energetică a tranziției de redresare dintre electrodul de aluminiu și regiunea n de înaltă rezistență a colectorului (a) și tranziția ohmică dintre electrodul de aluminiu și regiunea rz puternic dopată a emițătorului (b) a tranzistorului de siliciu înălțimea barierei de potențial la joncțiunea colectorului Prin urmare, cu polarizarea directă a joncțiunii colectorului și, în consecință, cu polarizarea directă a diodei

Schottky, partea principală a curentului continuu al colectorului va trece prin dioda Schottky Acest curent este asociat cu mișcarea electronilor din regiunea /v a colectorului la electrodul metalic și nu este însoțit de injectarea de găuri în regiunea /v a colectorului Astfel, în regiunea de înaltă rezistență a colectorului, practic nu există nicio acumulare de purtători de sarcină minori (Fig) În plus, datorită înălțimii mai mici a barierei de potențial la joncțiunea Schottky în comparație cu înălțimea barierei de potențial la joncțiunea colectorului, pentru aceiași curenți continui de colector, va exista o tensiune directă mai mică la joncțiunea colectorului, ceea ce corespunde la o cantitate mai mică de purtători de sarcină minori acumulați în baza tranzistorului în modul de saturație (Fig) Ca urmare, timpul de disipare într-un tranzistor cu o diodă Schottky este mult mai scurt (mai multe Orez Distribuția purtătorilor de sarcină minoritari în diferite regiuni ale tranzistorului în timpul funcționării acestuia în modul de saturație: a - în structura unui tranzistor plan convențional; b - în structura unui tranzistor similar cu o diodă Schottky conectată în paralel cu joncțiunea colectorului nanosecunde) decât timpul de disipare într-un tranzistor cu o structură similară, dar fără o diodă shunt Schottky Rețineți că barierele de potențial pot apărea și la contactul electrozilor de aluminiu cu regiunile p+ puternic dopate ale emițătorului și colectorului, dar grosimea lor se dovedește a fi atât de mică încât electronii pot trece prin astfel de bariere de potențial înguste aproape nestingheriți de tunel (vezi Fig) Astfel, tranzițiile ohmice sunt obținute la contactele electrozilor de aluminiu cu regiunea emițătorului și cu partea puternic dopată a regiunii colectoare, iar formarea lor și formarea tranziției Schottky de rectificare sunt efectuate în timpul unui proces de metalizare Fabricarea unui tranzistor integrat cu o diodă Schottky nu necesită introducerea unor operațiuni tehnologice suplimentare Este necesar doar să schimbați în mod corespunzător fotomască utilizată în fotolitografie pentru a îndepărta dioxidul de siliciu de sub contacte și pentru a extinde stratul de aluminiu depus dincolo de limita metalurgică a joncțiunii colectorului Cu toate acestea, la îndepărtarea dioxidului de siliciu în punctul în care joncțiunea colectorului iese pe suprafața unui monocristal de siliciu și la prelucrarea acestei suprafețe înainte de aplicarea metalizării aluminiului, este necesar să se prevină posibilitatea contaminării joncțiunii p-n a colectorului cu impurități necontrolate Tranzistor cu efect de câmp de poartă izolată Datorită particularităților structurii tranzistoarelor MIS, acestea pot fi formate fără insule speciale într-un singur cristal al unui circuit integrat, ceea ce simplifică tehnologia - reduce numărul de operațiuni tehnologice, reduce costul circuitelor integrate și face posibilă crește densitatea de ambalare O altă caracteristică și avantaj al tranzistoarelor MIS ca elemente active ale circuitelor integrate este că la tensiunea zero la poarta unui tranzistor MIS cu un canal indus, practic nu există curent de scurgere, adică puterea este consumată de tranzistor numai atunci când este aplicată tensiune până la poartă Această reducere a consumului de energie al circuitelor integrate bazate pe tranzistoare MIS cu canal indus este deosebit de semnificativă pentru crearea de circuite integrate logice De asemenea, este important ca circuitele integrate digitale să poată fi construite în întregime pe tranzistoare MIS interconectate galvanic fără utilizarea altor elemente Dioda Acest element activ este utilizat pe scară largă în circuitele integrate, în special în circuitele integrate logice Pentru a crea o diodă, în

general, este suficient să se formeze numai Orez Opțiuni posibile pentru utilizarea joncțiunilor pn ale unei structuri de tranzistor ca diodă (a) și circuitele lor echivalente (b) o joncțiune p-n Cu toate acestea, diodelor din circuitele integrate li se oferă o structură de tranzistor și, în funcție de scopul specific, una sau alta joncțiune pn este utilizată folosind una dintre cele cinci opțiuni de comutare posibile (Fig) În prima opțiune (/), este utilizată o joncțiune emițător, iar joncțiunea colectorului este scurtcircuitată Această includere este utilizată în microcircuite digitale, deoarece în acest caz se obține cea mai înaltă performanță: acumularea de purtători de sarcină poate avea loc numai în regiunea de bază și este foarte subțire Posibilitatea acumulării de purtători de sarcină în regiunea colectorului este exclusă prin manevrarea joncțiunii colectorului Timpul de comutare poate fi de aproximativ ns În a doua opțiune ( ), este utilizată o joncțiune emițător, iar circuitul colectorului este deschis În a treia opțiune ( ), este utilizată o joncțiune de colector, în timp ce regiunea emițătorului poate să nu fie prezentă, adică etapa de difuzie a impurităților pentru formarea regiunii emițătorului poate fi exclusă din procesul tehnologic Dacă se formează regiunea emițătorului, atunci circuitul emițătorului rămâne deschis Regiunea colectorului are de obicei o rezistență relativ ridicată, astfel încât o astfel de diodă are o tensiune de rupere destul de mare (~ V) Zona joncțiunii colectorului este mult mai mare decât zona joncțiunii emițătorului, astfel încât utilizarea joncțiunii colectorului ca structură de diodă face posibilă trecerea curenților mari înainte În a patra variantă ( ), regiunile emițătorului și colectorului sunt interconectate, adică joncțiunile emițătorului și colectorului sunt conectate în paralel În acest caz, curentul direct admis se dovedește a fi și mai mare, dar și capacitatea totală a barierei crește În varianta a cincea ( ), se folosește joncțiunea colectorului, iar joncțiunea emițătorului este scurtcircuitată § ELEMENTE PASIVE Rezistoare de difuzie În circuitele integrate semiconductoare, tranzistorul bipolar este elementul cu cea mai complexă structură Pentru a-l forma, este necesar să se efectueze succesiv mai multe etape de difuzie a impurităților Pentru a nu complica tehnologia de fabricație a unui circuit integrat, este indicat să folosiți una dintre zonele structurii tranzistorului pentru a crea rezistențe: emițător, bază sau colector (Fig) Regiunea emițătorului conține cea mai mare concentrație de impurități și are cea mai scăzută rezistivitate a stratului Prin urmare, regiunea emițătorului este potrivită pentru formarea de rezistențe de difuzie doar cu rezistență scăzută (aprox până la ohmi) Datorită concentrației mari de impurități, coeficienții de temperatură de rezistență a unor astfel de rezistențe vor fi mici (vezi Fig) Regiunea colector a structurii tranzistorului conține cea mai mică concentrație de impurități Prin urmare, regiunea colectorului este în general potrivită pentru formarea de rezistențe de difuzie cu rezistență mare, dar datorită concentrației scăzute Orez Opțiuni posibile pentru utilizarea diferitelor zone ale structurii tranzistorului ca straturi rezistive pentru formarea rezistențelor de difuzie ale unui circuit integrat semiconductor (a, b, c) și unele opțiuni de configurare pentru stratul rezistiv și electrozii rezistenți (d, e) radiouri de impurități, coeficienții de temperatură de rezistență ai unor astfel de rezistențe sunt mari Astfel, regiunea de bază a structurii tranzistorului este de obicei utilizată pentru a forma rezistențe de difuzie Fără o creștere semnificativă a suprafeței ocupate de rezistența de difuzie, în regiunea de bază pot fi create

rezistențe cu o rezistență de până la kΩ În același timp, astfel de rezistențe de difuzie au dependențe acceptabile de temperatură ale rezistenței; în orice caz, aceste dependențe sunt mai slabe decât pentru rezistențele de difuzie formate în regiunea colectorului Rezistoarele de difuzie, ca și alte elemente rezistive, se caracterizează prin următorii parametri: domeniul de rezistență nominală, toleranțe de rezistență, coeficientul de temperatură al rezistenței, puterea de disipare admisă și tensiunea maximă Pentru rezistențele de difuzie, intervalul de valori nominale a rezistenței, după cum s-a menționat, este limitat de mai sus În producția de masă a circuitelor integrate, rezistențele de difuzie nu pot fi realizate cu limite de toleranță suficient de mici din mai multe motive De exemplu, este dificil rezista la concentrația necesară de impurități de suprafață și adâncimea de difuzie cu mare precizie Diverse etape ale procesului fotolitografic, în ciuda perfecțiunii echipamentului utilizat, introduc o eroare semnificativă în valoarea absolută a rezistenței rezistenței de difuzie, în special pentru rezistențele cu o lățime îngustă a benzii de difuzie rezistivă Coeficientul de temperatură de rezistență al rezistenței de difuzie depinde de concentrația de impurități din stratul de difuzie utilizat Deoarece rezistențele de difuzie se formează în regiunile de bază ale structurilor tranzistoarelor, concentrația de impurități în aceste regiuni este determinată de parametrii și proprietățile necesari ale tranzistorilor Disiparea puterii admisibile a rezistențelor de difuzie este limitată de dimensiunea și topologia mică a benzii de difuzie rezistivă a rezistorului (Fig , d, ô) și este, de asemenea, legată de coeficientul de temperatură al rezistenței rezistorului, deoarece încălzirea Rezistorul cu un curent de trecere provoacă o modificare a rezistenței și duce la neliniaritatea caracteristicii I-V Tensiunea maximă este un parametru specific pentru rezistențele de difuzie Rezistorul de difuzie, după cum s-a menționat, este o bandă de difuzie cu un anumit tip de conductivitate electrică, separată de substratul circuitului integrat printr-o joncțiune pn Joncțiunea electron-gaură trebuie să fie polarizată invers pentru a izola banda de difuzie de substrat Prin urmare, căderea maximă de tensiune pe rezistor nu poate fi mai mare decât tensiunea de polarizare, care, la rândul său, nu poate depăși tensiunea de rupere a joncțiunii izolatoare p-n Pe lângă dezavantajele enumerate ale rezistențelor de difuzie și dificultățile în proiectarea și crearea de circuite integrate cu rezistențe de difuzie, trebuie remarcat faptul că în timpul formării circuitelor integrate în general și a circuitelor cu rezistențe de difuzie în special, în structură se formează elemente parazite a circuitului integrat, care poate perturba funcționarea normală a circuitului integrat Rezistorul de difuzie este separat de substrat printr-o joncțiune p-n, care are propria sa capacitate de barieră Această capacitate poate avea un efect semnificativ asupra funcționării circuitului la frecvențe înalte Un alt element parazit care apare lângă rezistorul de difuzie poate fi un tranzistor bipolar parazit, al cărui emițător este stratul rezistiv de difuzie, baza este regiunea colector a structurii tranzistorului original, iar colectorul este substratul circuitului integrat (Fig) Dacă joncțiunea izolatoare p-n dintre banda rezistivă și substrat (joncțiunea emițătorului tranzistorului parazit) este polarizat direct, atunci tranzistorul parazit poate perturba funcționarea micro-ului integrat sistem Prin urmare, este necesar ca scăderea de tensiune pe rezistorul de difuzie să nu depășească tensiunea maximă În ciuda dezavantajelor remarcate, rezistențele de

difuzie sunt utilizate pe scară largă în circuitele integrate, deoarece formarea lor nu necesită operațiuni tehnologice suplimentare și nu crește costul circuitului Rezistori de film Rezistorul de film este un film rezistiv format din (crom, tantal, paladiu), aliaj metalic Orez Configurație posibilă a rezistenței de film: - electrozi metalici; - film rezistiv; - substrat dielectric al unui circuit integrat hibrid Baza de metal (nicrom) sau cermet (cermet) Un film rezistiv de o anumită configurație se aplică într-un fel sau altul pe un substrat dielectric al unui circuit hibrid sau pe un cristal oxidat al unui microcircuit integral realizat prin logică (Fig) Materialul folosit pentru filmele rezistive trebuie să poată obține o gamă largă de valori nominale de rezistență, să aibă un coeficient de rezistență la temperatură scăzut, rezistență ridicată la coroziune și stabilitate a parametrilor în timp Cele mai răspândite sunt peliculele rezistive de nicrom datorită stabilității și posibilității de a crea cu un coeficient de rezistență la temperatură scăzut După depunerea filmului de nicrom, lingura este tratată termic prin recoacere a filmului în aer În acest caz, filmul de nicrom este acoperit cu un strat de oxid, ceea ce îmbunătățește foarte mult stabilitatea rezistenței de film La crearea rezistențelor de film pe un substrat dielectric, nu se formează elemente parazite, care sunt obținute în circuite integrate semiconductoare cu rezistențe de difuzie Pentru depunerea unei pelicule rezistive pot fi utilizate diferite metode: evaporarea termică a unui material rezistiv în vid (de la un evaporator rezistiv sau folosind un fascicul de electroni), pulverizare catodică, anodizare tehnologia combinată IN-PO cu microsemiconductor integrat pe subdielectricul pelicule metalice depuse pe un substrat și depunerea chimică în timpul unei reacții chimice în faza gazoasă Evaporarea termică în vid este cea mai simplă și mai productivă o metodă de obținere a foliilor rezistive, precum și a altor filme metalice și dielectrice necesare pentru fabricarea circuitelor integrate Unificarea operațiunilor tehnologice pentru obținerea diferitelor elemente ale unui circuit integrat, posibilitatea de fabricare a acestor diferite elemente într-un singur ciclu tehnologic reprezintă un avantaj semnificativ al evaporării termice în vid printre alte metode de aplicare a filmelor rezistive Condensatoare de difuzie joncțiunea p-n poate sator constantă Orez Structura unui condensator de difuzie folosind capacitatea de barieră a joncțiunii colectorului structurii tranzistorului (difuzia donatorilor pentru a forma regiunea emițătorului nu a fost efectuată) Ca condensatori de circuit integrat, capacitatea de barieră a unei joncțiuni p-n polarizate invers este adesea folosită Este convenabil să se formeze un astfel de element pasiv al unui circuit integrat simultan cu formarea structurilor de tranzistori sau să se utilizeze direct tranzițiile p-n ale structurilor de tranzistori (Fig) Capacitatea barieră poate fi utilizată pentru a crea atât un condensator, cât și un condensator variabil, care poate fi controlat prin modificarea polarizării DC la joncțiune (vezi §) Calitatea condensatoarelor de difuzie, precum și a altor condensatoare și adecvarea lor pentru utilizare în circuite integrate trebuie evaluată prin compatibilitatea lor tehnologică cu tehnologia altor elemente (în principal active) ale circuitelor integrate și prin parametri de bază precum intervalul nominal valorile capacității (sau capacitatea specifică), tensiunea de avarie, factorul de calitate, toleranțele capacității Gama de valori nominale ale capacității condensatoarelor de difuzie, care pot fi formate pe zonele monocristalului semiconductor alocate acestora, este determinată de concentrația de impurități în regiunile adiacente

joncțiunii Condensatoarele de difuzie care utilizează capacitatea emițătorului unei structuri de tranzistor au o capacitate specifică mai mare în comparație cu condensatoarele de la joncțiunea colectorului Cu toate acestea, cu o concentrație mare de impurități în regiunile adiacente tranziției și, în consecință, cu o grosime mică a tranziției, va exista o mică tensiune de defalcare a unei astfel de tranziții și, prin urmare, condensatorul de difuzie Astfel, capacitatea specifică și tensiunea de defalcare a condensatoarelor de difuzie trebuie luate în considerare împreună Relația dintre aceste para- contoare este nefavorabilă pentru condensatoarele de difuzie Factorul de calitate este inversul tangentei de pierdere dielectrică a condensatoarelor de difuzie, de obicei mult mai mic decât factorul de calitate al condensatoarelor discrete cu izolație dielectrică Cu toate acestea, costul formării condensatoarelor de difuzie este scăzut, deoarece aceștia sunt creați într-un singur proces tehnologic cu alte elemente ale unui circuit integrat Prin urmare, condensatorii de difuzie sunt folosiți pe scară largă în circuitele integrate, atunci când puteți suporta un factor de calitate scăzut Condensatorul de difuzie, ca și alte elemente ale circuitului integrat, trebuie izolat de alte elemente și de substratul circuitului integrat Adesea, această izolare este realizată printr-o joncțiune pn Prin urmare, atunci când se formează un condensator de difuzie, se formează simultan structura unui tranzistor parazit, al cărui emițător este una dintre regiunile (plăci) condensatorului de difuzie, baza este o altă regiune (placă), iar colectorul este substrat (Fig) Datorită dependenței capacității barierei de tensiunea de polarizare la joncțiunea pn, condensatoarele de difuzie pot fi utilizate pentru a amplifica oscilațiile electromagnetice, adică pot fi elemente active ale circuitelor integrate Condensatoare MD P Orez Structura Condensator MIS Ca dielectric al unui astfel de condensator, se folosește un strat de dioxid de siliciu, care acoperă cristalul semiconductor (Fig) O placă a condensatorului este un strat de metal (de obicei aluminiu) depus pe suprafața stratului de dioxid de siliciu simultan cu crearea de interconexiuni și plăcuțe; cealaltă placă este o regiune puternic dopată a semiconductorului, care se formează simultan cu formarea regiunilor emițătoare ale structurilor de tranzistori ale circuitelor integrate Astfel, procesul de fabricație a condensatoarelor MIS nu necesită operațiuni suplimentare pentru formarea lor Într-o insulă dedicată Condensatorii MOS nu formează regiunea de bază a structurii tranzistorului, adică nu efectuează difuzia impurităților pentru a crea regiunea de bază Prin urmare, sub condensatorul MOS există o singură joncțiune p-p între regiunea colector a tranzistorului structura torusului și un substrat, care este necesar pentru a izola condensatorul MIS de alte elemente situate pe aceeași placă semiconductoare Trebuie remarcat faptul că capacitatea unui condensator MIS poate avea o dependență complexă de tensiunea de polarizare DC și de frecvența tensiunii AC Acest lucru se datorează posibilității formării de straturi epuizate și inverse în apropierea suprafeței semiconductorului (în acest exemplu, lângă suprafața regiunii n+) sub acțiunea unui câmp electric care pătrunde în semiconductor Dependența de frecvență a capacității unui condensator MOS poate apărea dacă în semiconductor se formează un strat invers, în care acumularea și absorbția purtătorilor de sarcină minore pentru semiconductorul original apar ca urmare a proceselor de generare și recombinare termică și inerție dintre aceste procese pot fi mari Condensatoare cu film AlSiO Condensatorii cu film sunt formați pe substratul dielectric al

circuitelor integrate hibride În acest caz, este necesar să se efectueze cel puțin trei operații de depunere în vid: placa conductivă inferioară a condensatorului, filmul dielectric și placa conductivă superioară (Fig) Un astfel de condensator de film se numește condensator cu un singur strat Pentru a obține o capacitate mai mare sau pentru a reduce suprafața ocupată de condensator pe substrat, este posibil să se realizeze condensatoare cu film multistrat, ale căror secțiuni au "podele" - unul deasupra celuilalt Cu toate acestea, crearea de condensatoare "cu mai multe etaje" complică procesul de fabricare a acestora, deoarece este necesar să se introducă operațiuni suplimentare pentru aplicarea diferitelor straturi, crește costul, reduce fiabilitatea, crește procentul de rebuturi din cauza creșterii marginii efect, o scădere a densității și a puterii electrice rezistența termică a straturilor dielectrice superioare Diferite materiale pot fi folosite ca dielectric al condensatoarelor cu film, dar monoxidul de siliciu este cel mai utilizat Orez Structura condensatorului de film: - substrat dielectric; - căptușeală inferioară, - film dielectric; - căptușeală superioară Întrebări de control capitol Dispozitive semiconductoare bazate pe efectul tranziției intervale a electronilor § PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE AL GENERATOARELOR GUNN Pentru prima dată, generarea de oscilații electromagnetice cu microunde atunci când a fost aplicată o tensiune constantă unui cristal de arseniură de galiu omogen sau fosfură de indiu a fost observată în de omul de știință american J B Gann Prin urmare, în literatura tehnică sovietică, astfel de dispozitive sunt numite generatoare Gunn sau diode Gunn, deși nu există o tranziție electrică de rectificare în structura lor În literatura străină, abrevierea TED (Transferred - Electron Devices) este mai des folosită Fundamentele fizice ale rezistenței diferențiale negative la tranziția intervale a purtătorilor de sarcină Diagrama energetică a unor semiconductori (de exemplu, arseniura de galiu), construită în spațiul cvasi-impulsurilor (în spațiul fe), poate avea mai multe minime (vezi Fig) Într-un astfel de semiconductor, pot exista electroni cu mobilități diferite - "ușoare" și "grele" (vezi §) Raportul dintre concentrațiile de electroni "ușori" n\ și "grei" u se modifică odată cu modificarea tensiunii câmp electric, deoarece într-un câmp electric puternic (la o putere mai mare decât valoarea de prag E> Ethr), electronii, dobândind energie suplimentară ce depășește Δ ι (vezi Fig), merg în văi laterale și devin "grei" Dacă încă nu există ionizare de impact vizibilă, atunci concentrația totală de electroni rămâne neschimbată și egală cu concentrația de echilibru: Indicând mobilitatea electronilor "uşoare" μι, mobilitatea electronilor "grei" μ , scriem expresia pentru densitatea de curent printr-un cristal semiconductor după cum urmează: J = ¿/(ηιμι + η μ)E Lnop Orez Dependența densității de curent printr-un semiconductor cu o structură cu mai multe văi a benzii de conducere de intensitatea câmpului electric: - în prezența electronilor numai cu mobilitate mare μι (în valea centrală); - sectiune de tranzitie; - în prezența electronilor cu doar mobilitate redusă P EpoF), se poate presupune că practic toți electronii vor dobândi o energie suplimentară mai mare decât LEi și vor ajunge în valea laterală În acest caz, u ^/ și J = qn^E, care corespunde secțiunii din CVC (Fig) La intensități medii ale câmpului electric, depășind doar puțin puterea pragului, densitatea curentului este determinată de raportul dintre concentrația de electroni "ușori" și "grei" (secțiunea a CVC din Fig) Pentru apariția rezistenței diferențiale negative, tranziția simultană a majorității electronilor

de la valea centrală la valea laterală este necesară la un prag de intensitate a câmpului electric Dar, în practică, pentru a obține un CVC static corespunzător curbei solide din Fig eșuează, deoarece există întotdeauna neomogenități în cristal sau în apropierea contactelor neredresante, ca urmare a cărora apar intensități locale ale câmpului electric care depășesc puterea medie Transformare în aceste locuri electronii "uşori" în cei "grei" măresc şi mai mult neomogenitatea câmpului electric Prin urmare, trecerea simultană a majorității electronilor din cristal de la valea centrală la valea laterală este practic imposibilă, iar CVC static se obține fără o secțiune cu rezistență diferențială negativă (curba întreruptă în Fig) / | / o ȘI DENSITATEA - ^ efectul Gann Fie ca un cristal de arseniură de galiu dopat uniform (Fig), care are două joncțiuni electrice neredresoare cu electrozi catodici și anodici, să fie alimentat cu o tensiune constantă, care creează o intensitate a câmpului electric în cristal oarecum mai mică decât puterea de prag În acest caz, toți electronii liberi din cristal sunt "lumini", iar densitatea de curent prin cristal are o valoare maximă: Jmax qnO[i\Eo = qnovo Datorită prezenței diferitelor defecte, intensitatea câmpului electric local în apropierea contactelor care nu se redresează poate depăși puterea câmpului electric de prag Orez Distribuția concentrației de electroni și a intensității câmpului electric în cristalul generatorului Gunn în primul moment după aplicarea unei tensiuni constante Orez Distribuția concentrației de electroni și a intensității câmpului electric într-un cristal după formarea domeniului Acest lucru va asigura formarea de electroni "grei" în apropierea catodului, care, mișcându-se relativ lent spre anod, creează o sarcină negativă Electronii "uşori" din restul cristalului se deplasează spre anod mai repede decât cei "grei" Prin urmare, în apropierea pachetului de electroni "grei" din partea anodului, există o lipsă de electroni, ceea ce echivalează cu formarea unei anumite sarcini pozitive, constând din donatori ionizați necompensați (Fig) Astfel, se formează un domeniu format din două straturi: stratul de pe partea catodului are o sarcină negativă din cauza unui exces de electroni "grei", stratul de pe partea anodului are o sarcină pozitivă din cauza lipsei de electroni Domeniul are propriul său câmp electric Edom, îndreptat în aceeași direcție cu câmpul creat de exterior Voltaj Ca urmare, pe măsură ce domeniul se formează, câmpul din acesta crește, iar în afara domeniului scade, adică viteza de mișcare a electronilor "grei" în interiorul domeniului crește și viteza de mișcare a electronilor "ușori" în exterior domeniul scade La un moment dat, viteza de mișcare a electronilor "grei" (viteza domeniului) se dovedește a fi egală cu viteza de mișcare a electronilor "ușori": vi = v sau μιEι = μ E , unde v\ este viteza electronilor în afara domeniului; υ este viteza electronilor din domeniu, care corespunde vitezei domeniului de la catod la anod Este evident că υι εεορ, sau η /> εε υ/(^μ) * La rata de saturație a electronilor în arseniura de galiu vx IO cm/s, partea dreaptă a inegalității are o valoare de aproximativ IO cm- § TEHNOLOGIE FABRICAREA GENERATOARELOR DE PISTURI În ciuda simplității fundamentale a designului generatorului Gunn, care este un cristal omogen de arseniură de galiu cu conductivitate electrică de tip n cu două contacte depuse pe părți opuse ale cristalului, există dificultăți în producerea unor astfel de dispozitive, în primul rând din cauza trebuie să creați straturi subțiri de arseniură de galiu dopată uniform (sau alt material semiconductor) La oscilatoarele Gunn, care au o grosime a cristalului de peste μm cu o rezistivitate mare și funcționează în modul de

tranzit, oscilațiile sunt de obicei incoerente Acest lucru se datorează prezenței în fiecare dintre cristale a mai multor defecte, pe care domeniile se pot nuclea Calea parcursă de domeniu de la locul de origine până la anod determină perioada de oscilație Prin urmare, dacă domeniile sunt nucleate la diferite neomogenități ale cristalului, adică la distanțe diferite de anod, atunci oscilațiile vor avea un caracter de zgomot Utilizarea dispozitivelor cu tranziții intervale ale electronilor este practic justificată în domeniul de frecvență peste GHz, ceea ce corespunde grosimii unui semiconductor de înaltă rezistență /^ µm La rândul său, cea mai mică grosime a cristalelor semiconductoare cu rezistivitate mare pentru generatoarele Gunn, pe lângă dificultățile tehnologice, este limitată de faptul că este nevoie de energie suplimentară pentru a transfera un electron din valea centrală în valea laterală, pe care electronul o poate dobândi în un câmp electric după depășirea unei anumite distanțe Astfel, un electron poate dobândi energie suplimentară (, eV) în arseniura de galiu la un prag de intensitate a câmpului electric de kV/cm numai la o distanță de µm Domeniul în sine are, de asemenea, o oarecare întindere, determinată în principal de grosimea stratului părții pozitive a domeniului, deoarece densitatea sarcinii pozitive în stratul sărăcit de electroni este limitată de concentrația donorului din semiconductorul de înaltă rezistență (Md = IO * cm ") Limitarea grosimii minime a cristalului de înaltă rezistență duce la o limitare a frecvenței maxime de generare în modul de tranzit pentru generatoarele Gunn de la arseniura de galiu la valori de aproximativ GHz Primele dispozitive bazate pe efectul de tranziție intervalley a electronilor au fost realizate din arseniura de galiu și fosfură de indiu cu tranziții ohmice aliate între cristalul semiconductor și electrozi Dar metoda de fuziune este dificil de obținut produs de rezultatele unei grosimi mici a semiconductorului între tranzițiile ohmice Prin urmare, straturile epitaxiale depuse pe un substrat puternic dopat cu conductivitate electrică de tip n sunt utilizate în prezent în aceste scopuri Structurile multistrat n+-n-n+ sunt convenabile, în primul rând, pentru crearea tranzițiilor electrice nerectificative între electrozii metalici și straturile semiconductoare puternic dopate În al doilea rând, o placă cu o astfel de structură este suficient de puternică mecanic atunci când o tăiați în cristale individuale, când lipiți cablurile și o montați într-o carcasă § PARAMETRI ȘI PROPRIETĂȚI ALE GENERATOARELOR GANN Ca orice generator de microunde, generatorul Gunn se caracterizează prin puterea generată (în timpul funcționării pulsate și continue), lungimea de undă sau frecvența oscilațiilor generate, eficiența, nivelul zgomotului de frecvență și amplitudine și alți parametri Puterea de ieșire continuă a generatoarelor Gunn în modul de tranzit este de obicei de la zeci până la sute de miliwați, iar în timpul funcționării în impulsuri ajunge la sute de wați Frecvența de funcționare în modul de tranzit este invers proporțională cu lungimea sau grosimea părții de înaltă rezistență a cristalului (f = v/l) Relația dintre puterea generată și frecvență poate fi reprezentată ca P = = EV/r = ^ ~ Din aceasta rezultă, în primul rând, că puterea oscilațiilor cu microunde generate depinde de impedanța z sau de zona părții de lucru a stratului semiconductor de înaltă rezistență În al doilea rând, relația de mai sus indică faptul că schimbarea așteptată a puterii cu frecvența este proporțională cu /f Dependențele medii ale puterilor generate de frecvența diferitelor generatoare Gunn din arseniura de galiu și din fosfură de indiu sunt prezentate în Fig Generatoarele Gunn cu arseniură de galiu pot genera oscilații de microunde de la la GHz (fiecare dispozitiv este proiectat

pentru propria frecvență) La generatoarele Gunn din fosfură de indiu s-au obținut frecvențe ceva mai mari datorită vitezelor maxime mari ale electronilor, dar calitatea dispozitivelor din acest material este mult mai scăzută din cauza dezvoltării insuficiente a tehnologiei de fabricare a materialului Avantajul fosfurei de indiu față de arseniura de galiu ca material de pornire pentru dispozitivele bazate pe efectul tranziției electronilor intervalley este puterea câmpului electric de prag mai mare (, și, respectiv, , kV/cm) Această diferență ar trebui să conducă la crearea generatoarelor Gunn din fosfură de indiu cu semnificativ GaAs-/ InP GHz Orez Medie pentru multe generatoare Gunn, dependențele puterii generate de microunde de frecvență în timpul funcționării continue ( ) și în timpul funcționării în modul pulsat ( ) puteri mari de ieșire Pentru a crea oscilatoare Gunn cu frecvențe și mai mari ale oscilațiilor generate, dar cu puteri mai mici, compușii ternari Ga In Sb sunt de interes, deoarece vitezele de derivă ale electronilor în ei sunt mari, dar mai mici decât forțele de prag ale câmpului electric Eficiența generatoarelor Gunn poate fi diferită (de la la %), deoarece tehnologiile de fabricare a dispozitivelor și calitatea materialului semiconductor inițial diferă semnificativ În legătură cu posibila prezență a mai multor neomogenități în cristalul generatorului Gunn, așa cum s-a menționat în § , nuclearea unui domeniu poate avea loc la momente diferite la distanțe diferite de anod Prin urmare, frecvența de oscilație se va modifica, adică poate apărea zgomot de frecvență Pe lângă zgomotul de frecvență din generatoarele Gunn, există zgomote de amplitudine, a căror cauză principală sunt fluctuațiile vitezei electronilor În mod obișnuit, zgomotul de amplitudine în generatoarele Gunn este mic, deoarece viteza de derive în câmpurile electrice puternice care există în aceste dispozitive este saturată și se modifică puțin cu o modificare a câmpului electric Zgomotul generatoarelor Gunn este mult mai mic decât zgomotul diodelor de tranzit de avalanșă Important pentru aplicarea practică Una dintre principalele probleme ale oscilatoarelor Gann este problema posibilității de reglare a frecvenței lor într-un interval destul de larg Din principiul de funcționare al generatorului Gunn este clar că frecvența acestuia ar trebui să depindă slab de tensiunea aplicată Odată cu creșterea tensiunii aplicate, grosimea domeniului crește ușor, iar viteza mișcării sale se modifică nesemnificativ Ca urmare, atunci când tensiunea se schimbă de la prag la defalcare, frecvența de oscilație crește cu doar zecimi de procent Durata de viață a generatoarelor Gunn este relativ scurtă, ceea ce este asociat cu efectul simultan asupra cristalului semiconductor al unor factori precum un câmp electric puternic și supraîncălzirea cristalului datorită puterii eliberate în acesta § GENERATOARE CU ACUMULARE LIMITATĂ A TARIFEI DE VOLUM se formează domeniul Orez Explicația principiului de funcționare a unui generator cu acumulare limitată de încărcare spațială Să presupunem că, pe lângă o deplasare constantă mai mare decât Epor , unde Epor este puterea câmpului de prag, dispozitivului i se aplică și o tensiune sinusoidală de o amplitudine suficient de mare (Fig) În acest caz, o parte a perioadei, tensiunea de pe dispozitiv va fi mai mică decât valoarea de prag Epor Atâta timp cât valorile tensiunii instantanee din dispozitiv sunt mai mari decât tensiunea de prag Epor la catod Cu toate acestea, dacă dispozitivul este plasat într-un rezonator reglat la o frecvență suficient de mare, domeniul, înainte de a avea timp să se formeze, va începe să se dizolve, deoarece tensiunea de polarizare totală și oscilațiile rezonatorului în următoarea parte a perioadei vor fi mai mici decât

tensiunea de prag Epor/ În timpul formării domeniului, curentul care trece prin dispozitiv scade, iar în timpul resorbției acesta crește Astfel, apar oscilații periodice de curent, dar perioada acestor oscilații nu mai este determinată de timpul de tranzit al domeniului, ci de frecvența rezonatorului Astfel de generatoare sunt numite generatoare limitate de stocare a încărcăturii spațiale (SCV) Acest mod de funcționare al generatorului Gann [în transcriere în engleză - LSA (Limited Spacecharge Accumulation) a fost descoperit în Pentru a stabili un regim ONOS trebuie îndeplinite o serie de condiții În primul rând, este necesar ca domeniul să nu aibă timp să se formeze în timpul în care tensiunea la generator depășește valoarea de prag Epor /, perioada de oscilație T trebuie să fie mai mică decât ( ) m', unde τ' = ρ'εo este timpul de relaxare Maxwellian pentru un material într-o stare de rezistență diferențială negativă În timpul în care valorile instantanee ale tensiunii la generator sunt mai mici decât tensiunea de prag Epor/, domeniul care a apărut la catod trebuie să aibă timp să dispară complet Pentru a îndeplini această condiție, este necesar ca perioada de oscilație să fie mult mai mare decât timpul de relaxare Maxwellian τ pentru materialul într-un câmp electric slab Astfel, pentru existența regimului ONOS este necesară îndeplinirea condițiilor Γ = ψ , eV) Cu o bandă interzisă mai mică a semiconductorului original, cuantele de energie eliberate în timpul recombinării purtătorilor de sarcină corespund regiunii infraroșii a radiației Astfel, diferența dintre dispozitivele semiconductoare pentru afișarea informațiilor (reprezentarea vizuală a informațiilor tion) și diode emițătoare de infraroșu este doar în diferența dintre materialul semiconductor original Dacă recombinarea electronilor neechilibrați și a găurilor introduse în joncțiunea electrică de redresare sau în regiunile adiacente acesteia în timpul trecerii unui curent continuu a avut loc numai cu emisia de fotoni, atunci randamentul cuantic intern (raportul fotonilor emiși la numărul de perechi recombinate de purtători) ar fi egal cu % Cu toate acestea, o parte semnificativă a evenimentelor de recombinare se poate termina cu eliberarea de energie sub formă de cuante elementare de vibrații termice - fononi Astfel de tranziții ale electronilor între nivelurile de energie sunt numite non-radiative Raportul dintre tranzițiile radiative și neradiative depinde de o serie de motive, în special, de structura benzilor de energie ale semiconductorului, de prezența impurităților care pot crește sau scădea probabilitatea tranzițiilor radiative Dintre materialele semiconductoare stăpânite în prezent, cei mai buni din punct de vedere al randamentului cuantic intern sunt compușii $GaAs_{1-\chi}P_{\chi}$ la x = , Intervalul de bandă al acestor compuși crește de la , la x = la , eV la x = , În emițătorii semiconductori cu arseniură de galiu, adică la X = în sistemul specificat de compuși, randamentul cuantic intern atinge valori apropiate de % Când se folosesc alte materiale semiconductoare, randamentul cuantic intern este uneori doar de câteva procente, dar chiar și la astfel de valori, radiația este suficientă pentru utilizare practică Tehnologia de proiectare și fabricație Chiar și cu un randament cuantic intern ridicat, randamentul cuantic extern al emițătorilor semiconductori se dovedește a fi mult mai mic datorită absorbției fotonilor din semiconductor înainte ca aceștia să iasă în spațiul înconjurător și din cauza pierderilor datorate reflexiei interne totale a fotonilor incidente pe granita A) Orez Structuri ale emițătorilor semiconductori incoerenți: a - planar plat; b - emisferic; c - planar plat cu un strat semisferic transparent separarea semiconductorului și a atmosferei înconjurătoare la un unghi care

depășește unghiul critic de reflexie internă totală φcr = arc sin(l/nr), unde nr este indicele de refracție al semiconductorului De obicei fcr^ ° Astfel, dintr-un emițător semiconductor, care are cea mai simplă structură plată (Fig , a), doar o parte din fotonii care au apărut în joncțiunea electrică redresoare sau în apropierea acesteia intră în spațiul înconjurător Randamentul cuantic extern poate fi mărit prin utilizarea unor modele mai complexe de emițători semiconductori cu o structură sub formă de cristal semiconductor semiconductor (Fig , b) sau o structură plată cu un strat semiconductor transparent (Fig , c) La emițătoarele semiconductoare cu structură emisferică, pentru întreaga suprafață, unghiul de incidență al fotonilor este mai mic decât unghiul critic de reflexie internă totală la un raport mare al razelor /? și d (Fig , b), adică cu R/r> nr/nrz? , unde pg și pgsr sunt indicii de refracție ai radiației electromagnetice din semiconductor și mediul care înconjoară emițătorul semiconductorului (pgsr = pentru aer) Cu toate acestea, în emițătorii semiconductori cu structură emisferică, pierderea fotonilor ca urmare a absorbției crește oarecum, deoarece lungimea drumului lor de la locul de origine până la suprafața cristalului crește Toți emițătorii cu semiconductori cu structură emisferică au o eficiență cuantică externă care este cu un ordin de mărime mai mare decât cea a emițătorilor cu un design plat O tehnologie mult mai simplă pentru fabricarea emițătorilor semiconductori cu o acoperire semisferică (sau parabolica) transparentă din diverse materiale plastice cu un indice de refracție ridicat pentru a crește unghiul critic de reflexie internă totală în semiconductor Metoda principală de formare a joncțiunilor p-n și heterojoncțiunilor în crearea emițătorilor semiconductori pe bază de arseniură de galiu GaAs, fosfură de galiu GaP, soluții solide ale acestor compuși GaAsi xPx și alți compuși de tip AIPVV este metoda creșterii epitaxiale De obicei, aceasta este epitaxie în fază lichidă, uneori este epitaxie în fază de vapori Pentru a forma joncțiuni pn în carbură de siliciu SiC, se utilizează metoda difuziei impurităților și uneori metoda creșterii epitaxiale Una dintre caracteristicile interesante ale carburii de siliciu este politipismul său, adică existența mai multor modificări cristaline care diferă, în special, în banda interzisă Stabilitatea fizico-chimică ridicată a carburii de siliciu și coeficienții de difuzie relativ scăzuti ai impurităților din aceasta creează premisele pentru fabricarea emițătorilor semiconductori foarte stabili ππππ SHGOIGO Orez Construcția unui semn de pic indicator unic (indicator digital) pe baza acestui material Cu toate acestea, tehnologia de fabricație a monocristalelor de carbură de siliciu și tehnologia de formare a joncțiunilor electrice de rectificare în aceste monocristale sunt complexe În plus, nu este posibil să se obțină un randament cuantic ridicat în emițătoarele semiconductoare cu carbură de siliciu De mare interes pentru fabricarea emițătorilor semiconductori este nitrura de galiu GaN, care are cel mai mare interval de bandă (AE = , eV) dintre compușii de tip AIPVV, stăpâniți din punct de vedere tehnologic Energiile fotonice care pot fi excitate în acest material acoperă întreaga regiune vizibilă a spectrului Cu toate acestea, indiferent de metoda de preparare și dopare, nitrura de galiu are doar conductivitate electrică de tip η Prin urmare, pentru a obține radiații în timpul recombinării purtătorilor de sarcină neechilibrați, în acest caz, este necesar să se creeze o tranziție electrică de rectificare sub forma unei tranziții Schottky la contactul metalului cu nitrura de galiu O comparație a eficienței luminiscenței diferitelor materiale arată că randamentul cuantic crește odată cu creșterea lungimii de undă

Prin urmare, dacă percepția vizuală a informațiilor nu este obligatorie, ar trebui să se acorde preferință diodelor emițătoare de infraroșu pe bază de arseniură de galiu dispozitive de afișare a informațiilor în Semiconductor În funcție de structură, design și, bineînțeles, scop, acestea pot fi împărțite în diode emițătoare de lumină, indicatori de semne semiconductoare, scale și ecrane (vezi Fig) Astfel, în structura unei diode emițătoare de lumină există o singură joncțiune electrică redresoare (Fig) sau un element radiant semiconductor Un exemplu de proiectare a unui indicator de semn cu o singură cifră este prezentat în fig Structura acestui indicator iconic cos Este format din șapte elemente radiante și un punct zecimal, adică opt joncțiuni pn într-un singur cristal al unui semiconductor care emit lumină atunci când curentul trece în direcția înainte Diverse combinații de elemente radiante, furnizate prin comutare externă, vă permit să reproduceți numerele de la la și punctul zecimal Structura scalei semiconductoare poate fi fie mai multe diode emițătoare de lumină localizate de-a lungul unei linii, sau mai multor joncțiuni pn, situate de asemenea de-a lungul unei linii pe un substrat comun Un alt tip de structură la scară semiconductoare este o structură cu o geometrie controlată a câmpului luminos (Fig) Regiunea cu conductivitate electrică p-ty-pa are rezistență scăzută și, prin urmare, este practic echipotențială Regiunea cu conductivitate electrică de tip p are o rezistență relativ mare și, prin urmare Structura semi- Orez Scala Vodnikov cu o geometrie controlată a câmpului luminos (a) și distribuția potențialului de-a lungul regiunii p ușor dopate la diferiți curenți prin electrodul de control (b) atunci când se aplică tensiuni externe electrozilor nu vor fi echipotențiale Distribuția potențialului în regiunea p depinde de tensiunea aplicată electrodului de control (Fig , b) În consecință, dimensiunea câmpului luminos al semiconductorului depinde de tensiunea aplicată electrodului de control cântare Astfel de cântare semiconductoare pot fi folosite ca indicatori de reglare pentru receptoarele cu tranzistori, pentru înregistrarea informațiilor analogice pe film, ca scară pentru diferite instrumente de măsură și în alte scopuri Un exemplu de ecran semiconductor îl reprezintă dispozitivele de afișare a informațiilor semiconductoare AL A AL I, produse, totuși, ca indicatori de semne Ele constau din de diode emițătoare de lumină discrete conectate într-o matrice (șapte rânduri de cinci diode și o diodă separat) cu conexiune încrucișată și permit reproducerea numerelor și literelor Principalele caracteristici și parametri Luminozitatea emisiei Luminozitatea radiației este un parametru al dispozitivelor semiconductoare pentru afișarea informațiilor Unitatea de măsură a luminozității în sistemul SI este candela pe metru pătrat (cd/m) - luminozitatea unei surse de radiații, fiecare metru pătrat al suprafeței radiante a cărei intensitate luminoasă este egală cu o candela într-o direcție dată Trebuie remarcat faptul că măsurătorile luminii, strict vorbind, nu sunt chiar obiective Principalul "dispozitiv" cu care puteți măsura cantitățile de iluminare, în cele din urmă, este ochiul uman Eficacitatea impactului luminii asupra ochiului uman este determinată de o valoare specială, care se numește raportul dintre V - acesta este fluxul total al capacității noastre) la puterea corespunzătoare adevărată, deplină a razelor arată dependența Orez Vizibilitatea relativă K și V absolută a unui observator fotometric standard în funcție de lungimea de undă a radiației vizibilitate Relația de natură sve-F (adică costul energiei Fe: V=F/Fe Pe vizibilitatea față de lungimea de undă, așa cum este definită de Comisia Internațională

pentru Iluminare (CIE) Sensibilitatea ochiului este maximă la o lungime de undă de , microni Pentru un observator fotometric standard, W de energie radiantă la sensibilitatea maximă a ochiului corespunde la lm Raportul dintre vizibilitatea luminii la o lungime de undă dată și vizibilitatea maximă Vmax se numește vizibilitate relativă: ^=Vλ/Vmax Astfel, emițătorul, care își dă toată energia doar sub formă de radiație cu lungimea de undă de , microni, are cea mai mare luminozitate și eficiență din punctul de vedere al ochiului uman Cu toate acestea, emițătorii semiconductori sunt adesea folosiți pentru a transmite informații sub formă de impulsuri de radiație, care ajung la receptori de radiaţii cu caracteristici spectrale care diferă semnificativ de caracteristicile spectrale ale vizibilităţii ochiului uman În acest caz, luminozitatea radiației se poate dovedi a fi un parametru complet inutil Deci, pentru diode cu emitere infraroșu, principalul parametrul este puterea totală radiantă în wați sau miliwați la un anumit curent direct Caracteristica de luminozitate Emițătoarele semiconductoare cu o joncțiune electrică de redresare au o relativă rezistență scăzută atunci când această tranziție este activată în direcția înainte Prin urmare, astfel de emițători ar trebui considerați curenti dispozitive mi alimentate de surse sau generatoare de curent În consecință, caracteristica de luminozitate a dispozitivelor de afișare a informațiilor cu semiconductor este dependența luminozității de curentul care trece prin dispozitiv Este de dorit să existe o proporționalitate directă cu luminozitatea radiației de la curentul care trece, care va corespunde invarianței randamentului cuantic sau invarianței raportului evenimentelor de recombinare radiativă și neradiativă atunci când curentul se schimbă Un analog al caracteristicii de luminozitate pentru diodele emițătoare de infraroșu este dependența puterii radiației de curentul care trece Caracteristica spectrală este dependența puterii radiației de lungimea de undă a oscilațiilor electromagnetice emise (Fig) În prima aproximare, compoziția spectrală a radiației poate fi caracterizată prin culoarea strălucirii dispozitivelor semiconductoare pentru afișarea informațiilor și a diodelor emițătoare de infraroșu - prin lungimea de undă a radiației la maximul caracteristicii spectrale Dar informații mai detaliate sunt date, desigur, de caracteristica spectrală Parametrii emițătorilor semiconductori ca elemente ale unui circuit electric sunt determinați de caracteristica curent-tensiune Orez Caracteristicile spectrale ale emițătorilor semiconductori pe bază de arseniură de galiu ( ), soluție solidă de arseniură și fosfură de galiu ( ), fosfură de galiu ( ) și carbură de siliciu ( ) Orez CVC de emițători semiconductori realizate pe baza diferitelor materiale semiconductoare băț Diferențele dintre ramurile directe ale caracteristicilor I-V ale emițătorilor semiconductori din diferite materiale sunt cauzate în primul rând de diferența de bandă interzisă și, în consecință, de înălțimea barierei de potențial la joncțiunea pn (Fig) Ramurile inverse ale caracteristicilor I-V nu prezintă interes practic, deoarece emițătoarele semiconductoare cu o joncțiune electrică de redresare ar trebui să funcționeze numai atunci când sunt pornite în direcția înainte Cu toate acestea, trebuie avut în vedere faptul că tensiunile de defalcare ale emițătorilor semiconductori cu o joncțiune electrică redresoare nu depășesc câtiva volți Inerția emițătorilor semiconductori se caracterizează prin acestea sunt timpul de creștere a impulsului de radiație și timpul de dezintegrare a impulsului de radiație, care sunt de obicei măsurate între niveluri de radiație de , și , din amplitudinea impulsului de radiație Acești timpi sunt de

obicei unități sau zecimi de microsecundă Astfel, timpii de creștere și de scădere ai impulsului de radiație se dovedesc a fi parametri nesemnificativi pentru dispozitivele de afișare a informațiilor semiconductoare destinate indicației vizuale, deoarece inerția ochiului uman este destul de mare (aproximativ ms) Dimpotrivă, pentru diodele emițătoare de infraroșu, care sunt proiectate pentru procesarea informațiilor fără vizualizare, timpii de creștere și de scădere ai impulsului de radiație pot fi unul dintre parametrii principali § EMITĂTOARE ELECTROLUMINESCENTE DE PULBERE Principiul de funcționare Emițătoarele de pulbere electroluminiscente sunt una dintre varietățile de dispozitive semiconductoare emițătoare care utilizează electroluminiscența unui electroluminofor (vezi §) Emițător de pulbere electroluminiscent este un sistem multistrat format dintr-un substrat de sticlă, pe care un electrod conductor transparent din oxizi de diferite metale (SnCh, IP O , CdO etc), un strat de electroluminofor, un strat dielectric protector sub formă de acoperire de lac sau un strat subțire de dioxid sau oxid de siliciu (SiC> , SiO) și un al doilea electrod (Fig) Unul dintre cei mai obișnuiți electroluminofori este sulfura de zinc ZnS, activată hv Orez Structura pulberii electroluminiscente beamer: - substrat de sticlă, - electrod transparent; - strat de electroluminofor; - strat protector; - electrod metalic baie pentru a obține o strălucire strălucitoare cu impurități de cupru, mangan și alte elemente Granulele sau policristale de sulfură de zinc sunt ținute împreună printr-o legătură dielectrică Deoarece granulele individuale de pulbere de sulfură de zinc sunt separate printr-un strat de legătură dielectrică, condensatoarele electroluminescente pot funcționa numai la tensiune alternativă, adică excitația electroluminiscentă are loc sub acțiunea câmp electric Sub acțiunea tensiunii aplicate, atomii de impurități ai electroluminoforului sunt ionizați fie ca rezultat al tunelului de electroni de la nivelurile de impurități la banda de conducție (ionizare electrostatică), fie ca rezultat al ionizare de impact într-un câmp electric puternic în straturile superficiale epuizate de granule de sulfură de zinc După excitarea straturilor de suprafață ale boabelor electroluminoforului, are loc procesul de luminescență a electroluminoforului - recombinarea purtătorilor de sarcină cu eliberarea de energie în exces sub formă de cuante de lumină Odată cu recombinarea radiativă, apare și recombinarea neradiativă, în care excesul de energie este eliberat sub formă de cuante de energie termică Culoarea radiației este determinată de banda interzisă a electroluminoforului și de adâncimea nivelurilor de energie ale capcanelor de recombinare din banda interzisă Durata procesului de luminescență (afterglow) depinde de durata de viață a purtătorilor de sarcină minoritari și de prezența capcanelor de captare în electroluminofor, care pot crește semnificativ durata de viață efectivă a purtătorilor Principalele caracteristici și parametri Orez Luminozitatea caracteristică emițătorului de pulbere electroluminiscentă Unul dintre cei mai importanți parametri ai unui emițător de pulbere electroluminiscentă este luminozitatea efectivă la o anumită frecvență a unei tensiuni alternative și la o anumită valoare a acestei tensiuni sau densități de curent Luminozitatea efectivă a emițătorilor de pulbere electroluminiscente depinde de tensiunea aplicată (Fig) Caracteristica de luminozitate este neliniară, deoarece procesul de creștere a concentrației în exces a purtătorilor de sarcină în timpul ionizării de impact și în timpul efectului de tunel este caracterizat prin dependențe de puterea legii de tensiune (sau de

puterea câmpului electric) Neliniaritatea mare a caracteristicilor de luminozitate se dovedește a fi utilă în crearea de ecrane matrice electroluminescente și convertoare de imagine, ca Primiți un contrast mai mare al imaginii și o capacitate de agitare Abruptul caracteristicii de luminozitate, uneori modificarea luminozității atunci când emițătorul electroluminiscent este înjumătățit valorile Multiplicitatea modificărilor luminozității emițătorilor de pulbere electroluminiscente nu depășește Dependența luminozității efective de frecvența alternării cum dă posibilitatea unei rezoluții mai mari evalua multiplii tensiunii pe de la nominal tensiunea (Fig) se explică printr-o creștere a numărului de unde de luminozitate pe unitatea de timp cu creșterea frecvenței Spectrul de lumină emis de un emițător de pulbere electroluminiscentă este caracterizat de o lungime de undă corespunzătoare caracteristicii spectrale maxime a radiației Această lungime de undă depinde de diferența de energie dintre nivelurile între care are loc tranziția electronilor în timpul recombinării radiative § EMITĂTOARE ELECTROLUMINESCENTE DE FILM Principiul de funcționare Emițătorii de film electroluminiscent diferă de emițătorii de pulbere electroluminiscent prin faptul că între doi electrozi conțin o peliculă omogenă de electroluminofor policristalin creat prin evaporare termică urmată de depunere în vid Deoarece nu există nicio legătură dielectrică în electroluminoforul din emițătorii de film electroluminiscent, aceștia pot funcționa și pe curent continuu Excitarea unui electroluminofor, adică crearea unei stări de neechilibru a straturilor de suprafață ale cristalelor de electroluminofor individuale, are loc datorită injectării purtătorilor de sarcină prin bariere de potențial pe suprafața cristalelor de electroluminofor individuale în contact unele cu altele și datorită injectării de la electrozi În timpul recombinării purtătorilor injectați, excesul de energie poate fi eliberat sub formă de cuante de lumină Excitarea unui EL poate apărea și din cauza efectelor puternice de câmp (tunele și ionizare prin impact) în straturile de suprafață epuizate ale cristalelor EL Principalele caracteristici și parametri Grosimea filmului electroluminiscent în emițătoarele de film electroluminiscent este mică Prin urmare, tensiunea de funcționare a unor astfel de emițători (V) este mult mai mică decât tensiunea de funcționare a emițătorilor de pulbere electroluminiscente din electroluminofor pulbere cu un liant dielectric Caracteristica luminozității emițătorilor de film electroluminiscent, adică dependența luminozității strălucirii de tensiunea aplicată, este neliniară, deoarece caracteristicile I-V ale acestor dispozitive sunt neliniare Datorită neliniarității mai mari a caracteristicilor de luminozitate ale emițătorilor de film electroluminiscent în comparație cu neliniaritatea caracteristicilor similare ale emițătorilor de pulbere electroluminiscente, emițătorii de film au o rezoluție mai mare, ceea ce limitează măsurată prin dimensiunea cristalelor individuale de electroluminofor (IO- IO- mm) Puterea de rezoluție a emițătorilor de film este, de asemenea, mare, deoarece peliculele subțiri practic nu împrăștie lumina Multiplicitatea modificărilor luminozității emițătorilor de film electroluminiscent ajunge la Emițătoarele de film electroluminiscente sunt inferioare emițătorilor de pulbere electroluminiscente în ceea ce privește economia și durata de viață Durata de viață scăzută caracteristică a majorității dispozitivelor semiconductoare policristaline este asociată cu acțiunea simultană a intensităților mari ale câmpului electric și a temperaturilor ridicate la contactele punctuale dintre cristalele semiconductoare individuale Un alt dezavantaj al emițătorilor de film

electroluminiscent, precum și al emițătorilor de pulbere electroluminiscentă, este o mare răspândire a parametrilor Acest dezavantaj este, de asemenea, caracteristic tuturor dispozitivelor semiconductoare policristaline § LASERELE Principiul de funcționare În laserele semiconductoare sau în generatoarele cuantice optice (lasere cu semiconductor), radiația, ca și în diodele emițătoare de lumină, este generată prin recombinarea electronilor și a găurilor Cu toate acestea, această recombinare în lasere se dovedește a fi în principal nu spontană, ci forțată (stimulată) De aceea sursele de radiații stimulate se numesc lasere* Radiația în timpul recombinării forțate este coerentă (vezi §), care este diferența fundamentală dintre laserele semiconductoare și diodele emițătoare de lumină Fenomenul de recombinare stimulată face posibilă controlul emisiei atomilor semiconductori excitați folosind unde electromagnetice și astfel amplificarea și generarea luminii coerente Funcționarea unui laser necesită predominarea recombinării radiative stimulate asupra absorbției cuantelor de lumină Predominanța radiației asupra absorbției sau a absorbției asupra radiației depinde de raportul dintre atomii excitați și neexcitați din cristalul semiconductor, adică de populația nivelurilor de energie ale semiconductorului În condiții de echilibru, la niveluri de energie mai ridicate la orice temperatură a semiconductorilor, numărul de electroni este mai mic decât la niveluri mai mici de energie În același timp, este imposibil de obținut * Laser - amplificarea undelor luminoase prin emisie stimulată de radiație (amplificarea undelor luminoase folosind emisie stimulată) de lumină ca urmare a recombinării stimulate Pentru prevalența recombinării forțate asupra absorbției cuantelor de lumină, este necesar ca nivelurile superioare de energie să fie mai umplute cu electroni decât cele inferioare Starea unui semiconductor în care numărul de electroni dintr-unul dintre nivelurile de energie cu o energie mai mare este mai mare decât numărul de electroni dintr-un nivel cu o energie mai mică se numește stare cu populație inversată Absorbția cuantelor de lumină într-un semiconductor cu o populație inversă de niveluri de energie este mică, deoarece aproape nu există electroni în partea de sus a benzii de valență către care să poată fi transferată energia unei cuante de lumină Pe de altă parte, recombinarea forțată poate avea loc într-un semiconductor cu inversare a populației O populație inversată într-un semiconductor poate fi creată în diferite moduri:) prin injectarea purtătorilor de sarcină cu pornirea directă a joncțiunii p-n, care este utilizată în așa-numitele lasere de injecție;) prin excitație electronică, adică prin bombardarea semiconductorului cu un fascicul de electroni rapizi;) folosind pomparea optică, adică prin excitarea atomilor semiconductori de către cuante de lumină de la un emițător puternic de lumină incoerentă sau coerentă;) prin utilizarea efectelor unui câmp electric puternic, adică înmulțirea în avalanșă a purtătorilor de sarcină sau tunelarea electronilor în timpul tranziției lor de la nivelurile de energie situate în apropierea vârfului benzii de valență la nivelurile de energie situate în apropierea fundului benzii de conducție De cel mai mare interes practic este prima dintre metodele enumerate pentru crearea unei populații inverse Prin urmare, luăm în considerare laserele de injecție Tehnologia de proiectare și fabricare a laserelor de injecție Inversarea populației într-un laser de injecție cu o joncțiune p-n este mai ușor de obținut dacă una dintre regiunile structurii diodei este degenerată, adică conține o concentrație mare de impurități corespunzătoare Odată cu includerea directă a joncțiunii pn, curentul direct este format din două

componente: electron și gaură Cu cât trece mai mult curent prin joncțiunea pn, cu atât mai marginal este îndeplinită condiția inversă a populației Curentul minim la care are loc recombinarea predominant stimulată se numește curent de prag Dacă curentul care trece prin joncțiunea p-n este mai mare decât pragul, atunci joncțiunea p-n este un mediu de amplificare pentru propagarea luminii în planul joncțiunii p-n Numărul de evenimente de recombinare forțată poate fi crescut dacă fiecare cuantă de lumină este trecută de mai multe ori în planul de joncțiune pn Pentru a face acest lucru, două fețe opuse ale unui singur cristal semiconductorii sunt realizati strict paralel si lustruiti cu grija Pentru a asigura coeficientul de reflexie necesar de la capete, acestea nu pot fi metalizate, deoarece indicele de refracție ridicat al materialului semiconductor asigură reflectarea de la aceste capete până la % din quanta luminii După multiple reflexii de la capete lustruite și o diagramă a procesului de formare a unei avalanșe de fotoni în cavitatea optică a laserului (b): - regiune activă cu inversiune a populației; - suprafețele reflectorizante ale cristalului semiconductor iar trecerea multiplă corespunzătoare de-a lungul joncțiunii p-n, lumina iese din semiconductor (Fig) Cuantele de lumină care se deplasează strict perpendicular pe capetele cristalului pot trece de multe ori printr-o regiune activă cu o populație inversă și, prin urmare, pot crea o avalanșă mare de cuante de lumină Celelalte două fețe laterale trebuie să fie teșite sub unele unghi pentru a preveni generarea de lumină între ele (Fig) Acele cuante de lumină care au început să se miște nu de-a lungul joncțiunii p-n și nu perpendiculare pe capetele cristalului, ele părăsesc regiunea activă cu o populație inversă și nu provoacă recombinare forțată Pentru fabricarea de injecție Orez Construcția unui laser de injecție cu semiconductor: / - placa de molibden - electrod inferior; - zona cu conductivitate electrica /r-tip; - regiune activă cu inversiune a populaţiei; - regiune cu conductivitate electrică de tip p; - suprafețele terminale lustruite ale cristalului semiconductor; - electrod superior; - radiații / D R* Orez Diagrama energetică a unui laser de injecție cu semiconductori cu heterojoncțiuni fără tensiune aplicată (a) și la o tensiune directă (b) laserele folosesc arseniură de galiu, soluții solide de arseniură de galiu-fosfură GaAsi-χPχ, arseniură de indiu, fosfură de indiu și alte materiale semiconductoare Laserele de injectare cu arseniură de galiu sunt cele mai utilizate Materialul de plecare pentru astfel de lasere este un singur cristal de arseniură de galiu, a cărui formă este apropiată de un cub sau paralelipiped, cu laturile lungi de câteva zecimi de milimetru În arseniura de galiu dopată cu donatori (Te, Se etc), joncțiunea p-n este de obicei creată prin difuzia acceptoarelor (Zn, Cd etc) Regiunile cu conductivitate electrică de tip p și η ar trebui să aibă concentrații ale impurităților corespunzătoare la care stările energetice ale electronilor și găurilor sunt aproape de degenerare Pentru a crea un contact neredresant cu regiunea n, un singur cristal cu o structură de diodă este lipit pe o placă de molibden acoperită cu un strat de aur (Fig) Pe suprafața regiunii p este aplicat un strat dintr-un aliaj de aur și argint O inversare a populației poate fi creată mult mai ușor într-un laser cu injecție de semiconductor cu heterojoncțiuni (Fig) Regiunea de bază a unei astfel de structuri este alcătuită dintr-un semiconductor cu o bandă interzisă mai mică și o permitivitate mai mare decât regiunile emițătorului Injectat în bază dar- purtătorii de sarcină ajung în potențiale puțuri Diferența dintre indicii de refracție (permitități) ai regiunilor de bază și emițător duce la

reflectarea internă totală a cuantelor de lumină asupra eterogenei rotranziţii, adică regiunea de bază este, în esenţă, un ghid de lumină Toate acestea asigură densităţi de curent de prag semnificativ mai mici şi eficienţă sau eficienţă mai mare a laserelor de injecţie cu heterojoncţiuni Principalele caracteristici si parametrii Densitatea curentului de prag depinde în mod substanţial de temperatura laserului de injecţie: pentru laserele pe bază de arseniură de galiu, densitatea de curent de prag este de ordinul a A/cm la T = , K şi de ordinul IO A/cm la K Astfel, pentru a reduce densitatea curentului de prag, o răcire profundă a laserului de injecţie Laserele de injecţie care utilizează heterojoncţiuni, care au densităţi de curent de prag semnificativ mai mici, pot funcţiona în modul continuu Caracteristica spectrală a unui laser, ca orice altă sursă de lumină, este dependenţa intensităţii radiaţiei (adesea în unităţi relative) de lungimea de undă (Fig) La curenţi scăzuti (mai puţin decât pragul), radiaţia, care apare în principal din cauza recombinării spontane, este incoerentă Prin urmare, răspunsul spectral este larg, adică laserul funcţionează ca o diodă emiţătoare de lumină La curenţi mari (mai mari decât pragul), intensitatea radiaţiei este mult mai mare, deoarece radiaţia este coerentă şi strict dirijată Modelul de radiaţie al radiaţiei laser caracterizează distribuţia spaţială a intensităţii radiatii Radiaţia laserelor semiconductoare are un unghi de divergenţă destul de mic (care nu depăşeşte câteva grade) al fasciculului de lumină Dar în acest parametru, laserele semiconductoare sunt semnificativ inferioare laserelor dielectrice cu gaz şi în stare solidă, ceea ce este asociat cu dimensiunea mică a cristalului semiconductor şi, mai ales, cu dimensiunea mică a regiunii active în care are loc recombinarea stimulată Eficienţa unui laser de injecţie cu semiconductor pe bază de arseniură de galiu ajunge la %, în timp ce valoarea randamentului cuantic intern poate ajunge la %, adică fiecare electron injectat creează un foton la recombinare cu o gaură În ceea ce priveşte eficienţa, laserele cu injecţie cu semiconductori sunt superioare laserelor cu gaz şi cu stare solidă Orez Caracteristicile spectrale ale unei diode emiţătoare de infraroşu pe bază de arseniură de galiu la o temperatură de K: / - la un curent sub valoarea de prag (mod de funcţionare cu diodă radiantă); - la un curent peste valoarea de prag (mod de funcţionare cu laser de injecţie) lasere dielectrice, în care este egal cu miimi şi, respectiv, sutimi de procent Caracteristica luminozităţii laserului, adică dependenţa intensităţii radiaţiei de curentul care trece prin laser (Fig), este o dependenţă aproape liniară în domeniul curenţilor corespunzătoare predominanţei recombinării spontane (modul de funcţionare al laserului) dioda emiţătoare de lumină) şi predominanţa recombinării stimulate (modul de funcţionare al laserului) § FOTOrezistente Orez Luminozitatea caracteristică a unei diode emiţătoare semiconductoare pe bază de arseniură de galiu la diferite temperaturi Când fotorezistorul este iradiat cu fotoni, în stratul semiconductor fotosensibil apare o concentraţie în exces de purtători de sarcină (vezi §) Dacă fotorezistorului i se aplică o tensiune, atunci o componentă suplimentară de curent va trece prin acesta - fotocurent, din cauza concentraţiei în exces de purtători Componenta electronică a fotocurentului φη = αί?^Δπμη-γ-= abq(\ - /?)αηΝφτημηΕ , unde a este grosimea stratului fotosensibil semiconductor; b este lăţimea sa; / este distanţa dintre electrozi; R este coeficientul de reflexie; a este rata de absorbţie; η este eficienţa cuantică a generării; UV este numărul de fotoni incidenti pe o unitate de suprafaţă a stratului

fotosensibil pe unitatea de timp Fotocurentului corespunde trecerea prin fotorezistor și prin circuitul extern Ifp/q a electronilor Numărul de electroni care apar în volumul stratului fotosensibil datorită absorbției fotonilor este egal cu o Raportul dintre numărul de electroni care au trecut prin circuitul extern și numărul de electroni care au apărut în stratul fotosensibil se numește câștigul fotorezistorului: K=W? ab(] -/?) Produsul mobilității electronilor și intensității câmpului electric este viteza de deplasare a electronilor, care poate fi reprezentată și ca distanța dintre electrozi împărțită la timpul de zbor al purtătorilor dintre electrozi /protr Prin urmare, câștigul fotorezistorului poate fi exprimat în următoarea formă: Kι == τη/¿prol Dacă în stratul fotosensibil semiconductor există impurități care sunt capcane pentru purtătorii minoritari de sarcină (sensibilizarea sau detectarea impurităților), atunci captarea purtătorilor minoritari de către aceste capcane poate crește semnificativ (cu câteva ordine de mărime) durata de viață efectivă a purtătorilor majori de neechilibru În acest caz, durata de viață poate depăși semnificativ timpul de zbor al purtătorilor între electrozi Când unul dintre electroni ajunge la electrodul pozitiv, un alt electron intră în stratul semiconductor de la electrodul negativ pentru a menține neutralitatea electrică a majorității semiconductorului în care rămâne capcana de captare necompensată încărcată pozitiv Astfel, absorbția unui foton poate face ca mulți electroni să treacă prin fotorezistor Introducerea de impurități sensibilizante, ducând la creșterea duratei de viață efective a purtătorilor principali, determină o scădere a vitezei fotorezistorului Amplificarea fotocurentului poate avea loc și în prezența unor bariere de potențial, de exemplu, pe suprafața cristalelor semiconductoare, dacă fotorezistorul este realizat pe baza unui material semiconductor policristalin Barierele potențiale pot fi puțuri potențiale pentru purtătorii de încărcare minori În acest caz, va exista o amplificare a fotocurentului în fotorezistor prin analogie cu amplificarea fotocurentului în fototranzistor, care va fi discutată în § Tehnologia de fabricație și design Partea principală a designului fotorezistorului este un strat semiconductor fotosensibil, care poate fi realizat sub forma unei plăci semiconductoare monocristaline sau policristaline sau sub forma unui film semiconductor policristalin depus pe un substrat dielectric Ca material semiconductor pentru fotorezistoare, se utilizează în mod obișnuit sulfura de cadmiu, seleniura de cadmiu sau sulfura de plumb Electrozii metalici sunt aplicați pe suprafața stratului fotosensibil Uneori, electrozii sunt depuși direct pe substratul dielectric înainte ca stratul semiconductor să fie depus Suprafața stratului fotosensibil semiconductor situat între electrozi se numește zonă de lucru timid Fotorezistoarele sunt realizate cu platforme de lucru dreptunghiulare, sub formă de meandre sau sub formă de inel Zona locurilor de lucru ale diferitelor fotorezistoare este de obicei de la zecimi la zeci de milimetri pătrați Pe baza suprafeței platformei de lucru, puteți selecta corect dimensiunea fasciculului de lumină, puteți estima fluxul luminos la care ar trebui să funcționeze fotorezistorul etc Când utilizați fotorezistorul, se recomandă să iluminați complet platforma de lucru, întrucât efectul modificării rezistenţei fotorezistorului este maxim Un substrat cu un strat fotosensibil semiconductor depus pe acesta sau o placă semiconductoare este plasat într-o carcasă din plastic sau metal Principalele caracteristici și parametri Caracteristicile curent-tensiune ale fotorezistorului sunt dependențele curentului luminos /sw la un flux

luminos constant, precum și curentul de întuneric /ele de tensiunea aplicată fotorezistorului (Fig) În domeniul tensiunii de funcționare a caracteristicii I-V a fotorezistoarelor la diferitele valori ale fluxului luminos sunt aproape liniare Cu toate acestea, pentru majoritatea fotorezistoarelor de film și pentru fotorezistoarele cu un strat fotosensibil de material semiconductor policristalin, liniaritatea caracteristicii I-V este încălcată la tensiuni joase (caracteristica este superliniară) Această neliniaritate este asociată cu fenomene la contactele dintre boabe individuale sau cristale semiconductoare La tensiuni joase, rezistența fotorezistorului este determinată în principal de rezistența acestor contacte Tensiunea aplicată fotorezistorului scade în principal la contactele dintre boabele semiconductorului Prin urmare, tensiune Intensitatea câmpului electric la contacte este mare chiar și la tensiuni joase pe fotorezistor În acest sens, odată cu creșterea tensiunii aplicate, rezistența contactelor scade fie din cauza efectelor unui câmp puternic (de exemplu, tunelarea prin bariere subțiri de potențial asupra contactelor), fie din cauza încălzirii contactului apropiat regiuni ale granulelor semiconductoare individuale Odată cu o creștere suplimentară a tensiunii, rezistența fotorezistorului este deja determinată de rezistența de volum a granulelor semiconductoare și, prin urmare, va rămâne constantă, ceea ce corespunde secțiunii liniare a caracteristicii I-V el ^teme Orez Fotorezistor CVC: - fără iradiere (în întuneric); - în timpul iradierii c Orez Lumina caracteristică fotorezistorului La tensiuni înalte pe fotorezistor, caracteristica I-V se poate abate din nou de la liniară, devenind superliniară Superliniaritatea este asociată cu o creștere a temperaturii întregului strat fotosensibil datorită puterii mari degajate Lumina, sau lux-amperul, caracteristică fotorezistorului este dependența fotocurentului / f \u d / St / celor de iluminare sau de fluxul de lumină incident pe fotorezistor Fotorezistoarele au de obicei o caracteristică de lumină subliniară (Fig) Subliniaritatea caracteristicii luminii este explicată prin deplasarea nivelurilor de demarcație, sau a nivelurilor cvasi-Fermi, pentru electroni și găuri cu o abatere crescândă de la starea de echilibru odată cu creșterea iluminării: nivelul de demarcație electronică (nivelul cvasi-Fermi pentru electroni) se schimbă la banda de conducere ca urmare a creșterii concentrației de electroni liberi, nivelul de demarcație a găurilor (nivelul cvasi-Fermi pentru găuri) se deplasează simultan la banda de valență datorită creșterii con centrarea orificiilor (vezi Fig) Datorită deplasării nivelurilor de demarcație, unele niveluri de capcane de captură devin niveluri de capcane de recombinare Odată cu creșterea concentrației capcanelor de recombinare, durata de viață a purtătorilor de sarcină scade, ceea ce este primul motiv pentru subliniaritatea caracteristicii luminii Modelele de creștere a fotocurentului cu iluminare sunt diferite pentru diferite fotorezistoare și sunt determinate de concentrația anumitor impurități în semiconductor și de distribuția nivelurilor de impurități pe banda interzisă a diagramei energetice a semiconductorului Al doilea motiv care duce la subliniaritatea luminii caracteristice fotorezistorului este o scădere a mobilității purtătorilor de sarcină odată cu creșterea iluminării datorită creșterii concentrației de atomi ionizați în semiconductor și, în consecință, datorită creșterii împrăștierii a purtătorilor de sarcină de către atomii ionizați Într-o gamă îngustă de iluminare, dependența este adesea folosită pentru a aproxima caracteristica luminii /f=AEx, unde A și X sunt coeficienți care sunt constanți pentru un anumit

fotorezistor în domeniul de iluminare selectat; E - iluminare Caracteristica spectrală a fotorezistorului este dependența fotocurentului de lungimea de undă a luminii incidente pe fotorezistor (Fig) La lungimi de undă mari, adică la energii scăzute ale fotonilor de lumină în comparație cu banda interzisă a unui semiconductor, energia cuantică este insuficientă pentru a transfera un electron din banda de valență în banda de conducție Prin urmare, pentru fiecare semiconductor și, în consecință, pentru fiecare fotorezistor, există o lungime de undă de prag (cel mai Orez Caracteristicile spectrale medii ale diferitelor fotorezistoare: - FSK; - FSD; - FSA; - SF mare), care este de obicei definită ca lungimea de undă corespunzătoare dezintegrarii fotocurentului cu % din partea lungimilor de undă mari La lungimi de undă scurte, pe măsură ce lungimea de undă a luminii incidente pe fotorezistor scade, indicele de absorbție crește Prin urmare, adâncimea de penetrare a cuantelor de lumină în semiconductor scade, adică partea principală a purtătorilor de sarcină neechilibrați apare în apropierea suprafeței iluminate a stratului fotosensibil În acest caz, rolul recombinării de suprafață crește și durata medie de viață a purtătorilor de neechilibru scade Astfel, caracteristica spectrală are și o scădere la lungimi de undă mici Diferiți semiconductori au benzi interzise care variază de la zecimi la eV Prin urmare, caracteristica spectrală maximă a diferitelor fotorezistoare poate fi în părțile infraroșu, vizibile sau ultraviolete ale spectrului electromagnetic Constanta de timp este timpul în care fotocurentul fotorezistorului se modifică după iluminare sau după întunecarea fotorezistorului cu % (e ori) în raport cu setarea valoare Astfel, constantele de timp caracterizează viteza de reacție a fotorezistorului la o modificare a fluxului de lumină, adică caracterizează inerția fotorezistorului Datorită faptului că rata de creștere a fotocurentului în timpul iluminării diferă oarecum de rata declinului acestuia după întunecarea fotorezistorului, se disting constantele de timp de creștere t și constantele de timp tsp Valorile numerice ale constantelor de timp ale diferitelor fotorezistoare sunt de la zeci de microsecunde la zeci de milisecunde Constantele de timp sunt măsurate la o iluminare de lux, o temperatură ambientală de °C și o rezistență de sarcină inclusă în circuitul de măsurare, mai mică de kOhm Iluminarea la determinarea constantelor de timp este produsă de obicei dintr-o sursă de radiație cu o temperatură de culoare de K Toate aceste condiții sunt necesare la măsurarea constantelor de timp pentru unicitatea rezultatelor obținute, deoarece constantele de timp depind de concentrația capcanelor de captare și de viteza de umplere și golire a acestora, care, la rândul său, se modifică odată cu schimbările de iluminare, temperatură și alte condiții în care funcționează fotorezistorul Astfel, odată cu creșterea iluminării, numărul de capcane de captură scade și numărul de capcane de recombinare crește datorită divizării nivelului Fermi în cvasi-niveluri sau deplasării nivelurilor de demarcație (vezi Fig) Ambii acești factori conduc la o scădere a duratei de viață a purtătorilor de sarcină și, în consecință, la o scădere a constantelor de timp ale fotorezistorului Odată cu creșterea temperaturii, probabilitatea de ionizare a capcanelor de captare crește, ceea ce înseamnă o epuizare mai rapidă a acestora și o scădere a constantelor de timp Prezența unei inerții semnificative în fotorezistoare duce la faptul că, odată cu creșterea frecvenței de modulare a fluxului luminos, valoarea efectivă a fotocurentului alternativ rezultat scade Frecvența maximă de modulare a fluxului luminos pentru fotorezistoare nu depășește zeci de kiloherți Rezistența

la întuneric este rezistența fotorezistorului în absența luminii Se obișnuiește să se determine rezistența la întuneric la s după întunecarea fotorezistorului, care a fost anterior sub iluminare de de lux Acest lucru se datorează inerției de golire a capcanelor de captare după oprirea luminii De exemplu, pentru fotorezistoarele FSK- , raportul rezistențelor la întuneric măsurat după întunecare după s și după ore poate atinge trei ordine de mărime Sensibilitatea integrală specifică este raportul dintre fotocurent și fluxul luminos și tensiunea aplicată: K = /φ/(Φí) Sensibilitatea se numește integrală, deoarece se măsoară atunci când fotorezistorul este iluminat cu lumină dintr-un spectru complex compozitie: dintr-o sursa de lumina cu temperatura de culoare de K la o iluminare de lux Sensibilitatea integrată specifică a diferitelor fotorezistoare variază de la la mA/(V-lm) § FOTODIODĂ În mod obișnuit, diodele semiconductoare cu o joncțiune p-n, polarizate invers de o sursă de alimentare externă, sunt utilizate ca fotodiode Când cuante de lumină sunt absorbite în joncțiunea pn sau în regiunile adiacente ale cristalului semiconductor, se formează noi purtători de sarcină (perechi de electroni) Orez Ramuri inverse ale CVC ale unei fotodiode la diferite fluxuri de lumină Orez Mișcarea purtătorilor de sarcină neechilibrați formați din cuante de lumină în joncțiunea p-n sau în apropierea acesteia, cu o tensiune inversă la joncțiune ron - gaura) Purtătorii minoritari care au apărut în regiuni adiacente joncțiunii p-n la o distanță care nu depășește lungimea de difuzie difuzează către joncțiunea p-n și trec prin aceasta sub acțiunea unui câmp electric sau, din punctul de vedere al diagramei energetice, se derulează bariera de potențial (Fig) Prin urmare, curentul invers prin fotodiodă crește odată cu iluminarea Absorbția cuantelor de lumină direct în joncțiunea pn duce la un rezultat similar Ca urmare, atunci când fotodioda este iluminată, curentul invers prin ea crește cu o cantitate numită fotocurent (Fig) În domeniul de funcționare al tensiunilor inverse, când fotodioda este iluminată, curenții inversi sunt practic independenți de tensiunea aplicată, deși ramura inversă a CVC a fotodiodei în stare întunecată poate să nu aibă o secțiune de saturație a curentului Designul fotodiodei, desigur, ar trebui să prevadă nevoia de a ilumina cristalul semiconductor cu protecția simultană a acestui cristal de alte influențe externe (Fig) Proprietățile fotodiodelor pot fi caracterizate prin parametri și dependențe similare cu cele ale fotorezistoarelor Cu toate acestea, fotodiodele au caracteristici distinctive semnificative Deci, caracteristica luminii unei fotodiode, adică dependența fotocurentului de iluminare, corespunde proporționalității directe a fotocurentului de iluminare Acest lucru se datorează faptului că grosimea bazei fotodiodei este mult mai mică decât cea difuză lungimea zonei purtătorilor minoritari de taxe Prin urmare, aproape toți purtătorii minoritari care au apărut în bază ca urmare a generării de lumină ajung la joncțiunea p-n și iau parte la formarea fotocurentului În orice caz, pierderile purtătorilor de sarcină minoritari pentru recombinare în bază și pe suprafața bazei sunt practic independente de iluminare, deoarece semiconductorul inițial conține o cantitate mică de impurități necontrolate care ar putea juca rolul de capcane de recombinare și de captare capcane Consecința liniarității luminii caracteristice fotodiodei este independența sensibilității integrale a fotodiodei față de tensiunea inversă aplicată Prin urmare, unul dintre principalii parametri ai fotodiodei nu este sensibilitatea integrală specifică, ci pur și simplu sensibilitatea integrală: K \u d DACA / F Orez Designul fotodiodei într-o carcasă metalică: - cristal semiconductor cu o

joncțiune pn; - suport de cristal; - corp; - ieșire internă; - tub insidios; - izolator bucșă de sticlă; - piciorul corpului; - inel de lipit; - lentila de sticla O altă caracteristică a fotodiodelor și avantajul lor important față de fotorezistoare este inerția lor scăzută În general, inerția fotodiodelor poate fi afectată de trei factori fizici: timpul de difuzie sau deplasare a purtătorilor de sarcină neechilibrați prin baza td; timpul zborului lor prin tranziția pn τζ; timpul de reîncărcare a capacității de barieră a joncțiunii pn, caracterizat prin constanta de timp rCbar Timpul de difuzie al purtătorilor de sarcină prin baza unei fotodiode poate fi determinat în mod similar cu timpul de zbor al purtătorilor prin baza unui tranzistor folosind formulele ( ) sau ( ) În fotodiodele cu germaniu aliat, grosimea bazei este de μm și Tg ≈ ns - Timpul de zbor al transportatorilor prin joncțiunea pn T/ /i^max , unde δ este grosimea joncțiunii pn; ümax este viteza maximă de deriva a purtătorilor de sarcină (vezi §) În germaniu și siliciu ümaxæ - é cm/s, grosimea joncțiunii p-n, în funcție de tensiunea inversă și concentrația de impurități în bază, este de obicei mai mică de microni În consecință, timpul de zbor al transportatorilor prin joncțiunea p-n este τz " , ns Constanta de timp a fotodiodei rCbar este determinată de capacitatea barieră dependentă de tensiune a joncțiunii p-n și de rezistența bazei fotodiodei la o rezistență de sarcină scăzută în circuitul extern Rezistența de bază a fotodiodelor este mult mai mare decât cea a altor diode, deoarece contactul neredresator la baza fotodiodei este situat de-a lungul marginilor bazei și nu pe întreaga suprafață (Fig) Prin urmare, o scădere a grosimii bazei poate duce nu la o scădere, ci la o creștere a rezistenței bazei Constanta de timp a fotodiodelor rCbar se obține de ordinul nanosecundelor Astfel, inerția fotodiodelor aliate este determinată de timpul de difuzie al purtătorilor de sarcină prin bază În fotodiodele de difuzie, prin crearea unui câmp electric de accelerare în bază datorită distribuției neuniforme a impurităților, este posibil să se reducă timpul de zbor al purtătorilor prin bază la câteva nanosecunde În astfel de fotodiode, toți cei trei factori au aproximativ același efect asupra inerției Caracteristica spectrală a fotodiodelor este determinată și din partea lungimilor de undă lungi de banda interzisă a materialului semiconductor inițial, la lungimi de undă mici - de un indice mare de absorbție și o creștere a influenței recombinării suprafeței purtătorilor de sarcină cu o scădere a lungimea de undă a cuantelor de lumină Astfel, limita de fotosensibilitate pe lungime de undă scurtă a unei fotodiode depinde de grosimea bazei și de viteza de recombinare a suprafeței Prin scăderea acestor valori, se poate deplasa semnificativ limita de lungime de undă scurtă a fotosensibilității fotodiodelor către lungimi de undă mai scurte Poziția maximului în caracteristica spectrală a fotodiodei depinde puternic de gradul de creștere a coeficientului de absorbție într-un semiconductor dat Cu o creștere bruscă a coeficientului de absorbție cu scăderea lungimii de undă a luminii incidente, de exemplu, în germaniu, poziția maximului este determinată de banda interzisă (Àmax = , μm) și este practic independentă de grosimea bazei Dacă dependența coeficientului de absorbție de lungimea de undă este slabă, ca, de exemplu, în siliciu, atunci efectul de reducere a pătrunderii cuantelor de lumină în adâncimea semiconductorului și creșterea rolului recombinării suprafeței va fi mai slab odată cu scăderea lungimii de undă Prin urmare, spectrul maxim caracteristicile se pot schimba cu modificări ale grosimii bazei și ale ratei de recombinare a suprafeței Astfel, caracteristica spectrală maximă a fotodiodelor de siliciu poate

fi deplasată în intervalul de la , la µm prin schimbarea proiectării și tehnologiei de fabricație a acestora Fotodiode metal-semiconductoare Structura unei fotodiode bazată pe o joncțiune redresoare metal-semiconductor și diagrama energetică a acesteia la tensiune inversă sunt prezentate în fig La principal o parte din quanta luminii a pătruns în electrodul metalic superior /, grosimea acestuia ar trebui să fie mică (aproximativ nm pentru Au) Pierderea prin reflexie poate fi redusă prin utilizarea acoperirilor antireflex Principiul de funcționare al unei fotodiode bazată pe o joncțiune metal-semiconductor rectificatoare este similar cu principiul de funcționare al unei fotodiode cu o joncțiune pn Cu toate acestea, există unele diferențe care afectează caracteristicile și parametrii Prima diferență este posibilitatea de absorbție a cuantelor de lumină cu energie mai mică decât banda interzisă, pentru care semiconductorul este transparent, în metalul electrodului superior În acest caz, dacă energia cuantelor luminoase depășește înălțimea de bariera de potențial, apoi electronii excitați din metal pot trece în semiconductor prin bariera de potențial (Fig), asigurând astfel apariția unui fotocurent Prin urmare, limita lungimii de undă lungă a caracteristicii spectrale a fotodiodelor bazate pe un contact metal-semiconductor este determinată de înălțimea barierei de potențial la acest contact și este situată la lungimi de undă mai mari ale electricității Orez Structura unei fotodiode cu o joncțiune de redresare între un metal și un semiconductor (a) și diagrama energetică a acestei structuri la tensiune inversă (b)' - electrod subțire din metal transparent; - al doilea electrod metalic, formând o tranziție ohmică cu un cristal semiconductor spectrul tromagnetic O altă diferență între fotodiodele luate în considerare este că, odată cu scăderea lungimii de undă a cuantelor de lumină (cu creșterea energiei cuantelor) și cu o creștere a indicelui de absorbție într-un semiconductor, cuantele de lumină continuă să fie absorbite în sarcina de volum strat, unde există un câmp electric Prin urmare, scurtul * noua limită a caracteristicii spectrale a fotodiodelor bazată pe tranziția metal-semiconductor este situată la lungimi de undă mai scurte ale spectrului electromagnetic Astfel, răspunsul spectral al unei fotodiode bazate pe o joncțiune metal-semiconductor este mult mai larg decât răspunsul spectral al unei fotodiode cu o joncțiune p-m bazată pe același semiconductor În plus, rezistența de bază a unei fotodiode bazate pe o joncțiune metal-semiconductor este mult mai mică Prin urmare, constanta de timp rC se dovedește a fi mică, iar inerția este determinată în principal numai de timpul de zbor al purtătorilor prin regiunea de încărcare spațială la joncțiunea metal-semiconductor de rectificare Acest timp de zbor poate fi de ordinul , , ns, ceea ce face posibilă utilizarea fotodiodelor bazate pe o tranziție metal-semiconductor cu modularea cu microunde a fluxului luminos Fotodiode bazate pe o heterojoncție Orez Diagrama energetică a unei heterojoncții la tensiune inversă și când este iluminată de cuante de lumină cu energii diferite (Lv'>Lv) ^ hv' hv Diagrama de energie a unei heterojoncții polarizate invers este prezentată în fig Când o fotodiodă cu o astfel de heterojoncție este iluminată din partea unui semiconductor cu decalaj larg cu cuante de lumină cu energie /iv (Δ ι>/τν>Δ), lumina este absorbită în semiconductorul cu decalaj îngust Un semiconductor cu decalaj larg se dovedește a fi transparent la astfel de cuante de lumină Purtătorii de sarcină minoritari care apar în acest caz, trecând prin heterojoncțiune, creează un fotocurent Pe măsură ce lungimea de undă a luminii incidente pe fotodiodă scade, coeficientul de absorbție al semiconductorului cu distanță îngustă

crește Adâncimea de penetrare a cuantelor în acest semiconductor scade Generarea purtătorilor de neechilibru are loc numai în apropierea heterojoncției La lungimi de undă mici ale luminii incidente (Λνζ>>Δ), cuantele de lumină sunt absorbite într-un semiconductor cu decalaj larg Astfel, caracteristica spectrală a unei fotodiode bazate pe o heterojuncție este mai largă în comparație cu cea spectrală caracteristicile nymi ale fotodiodelor bazate pe tranziții p-n convenționale § FOTOCELELE SEMICONDUCTORE Principiul de funcționare Orez Separarea purtătorilor de sarcină neechilibrați la bariera potențială a unei tranziții pn în absorbția cuantelor de lumină Fotocelula funcționează fără surse externe de energie și este ea însăși o sursă de energie electrică Luați în considerare principiul de funcționare al unei fotocelule cu o joncțiune pn ca joncțiune de redresare Când o fotocelulă este iluminată, datorită absorbției cuantelor de lumină în joncțiunea p-n și regiunile semiconductorului adiacente joncțiunii p-n, sunt generați noi purtători de sarcină Câmpul electric de difuzie care există în joncțiunea pn produce o separare a purtătorilor de sarcină neechilibrați Cu alte cuvinte, din punctul de vedere al diagramei energetice a joncțiunii p-n (Fig), electronii neechilibrați se rostogolesc de pe bariera de potențial și cad în regiunea n, găuri, dimpotrivă, în p- regiune Ca urmare a acumulării de electroni în regiunea η și a găurilor în regiunea p, între aceste regiuni apare o diferență suplimentară de potențial - foto-emf Acumularea de purtători de neechilibru în regiunile corespunzătoare nu poate continua la infinit, deoarece simultan cu acumularea de găuri în regiunea p și de electroni în regiunea η, înălțimea barierei de potențial scade cu valoarea foto-emf care are a apărut Reducerea înălțimii barierei de potențial sau reducerea intensității câmpului electric total în joncțiunea pn înrăutățește "proprietățile de separare" ale joncțiunii Pe lângă componenta foto-EMF, care apare din cauza separării purtătorilor de sarcină de către câmpul electric al joncțiunii pn sau altă barieră de potențial și care este principala în fotocelule, pot exista și alte componente Când un semiconductor este iluminat, apare un gradient de concentrație de electroni și găuri, care difuzează de la suprafața iluminată în adâncimea semiconductorului Dar coeficienții de difuzie ai electronilor și găurilor sunt diferiți Prin urmare, există o a doua componentă a foto-EMF (vezi §) În plus, dacă există capcane pentru captarea purtătorilor unui semn pe suprafața iluminată a semiconductorului, o a treia componentă a foto-EMF apare ca urmare a difuzării în adâncimea semiconductorului purtătorilor de sarcină a celuilalt semn Tehnologia de fabricație și design Hai Orez Structura unei fotocelule de siliciu fabricată prin difuzie de impurități În prezent, celulele fotovoltaice sunt utilizate pe scară largă sub formă de celule solare (un set de fotocelule conectate electric) pentru a converti energia luminii solare direct în energie electrică care alimentează instalațiile navelor spațiale Fotocelulele din siliciu sunt de obicei folosite în aceste scopuri O tranziție electron-gaură într-o placă de siliciu monocristal cu Conductivitatea electrică de tip p este creată prin difuzia fosforului sau a antimoniului (Fig) La o concentrație mare de donatori (fosfor sau antimoniu) în stratul superficial de siliciu, conductivitatea regiunii η este ridicată Prin urmare, un contact nerectiv cu această regiune poate fi realizat sub forma unui inel sau a unui cadru, lăsând accesibilă întreaga suprafață a cristalului pentru iluminare Orez CVC al fotocelulei la diferite fluxuri de lumină incidente pe fotocelulă Principalele caracteristici și parametri Caracteristici volt-amper

Modul de funcționare al fotocelulei (mod de generare foto-EMF) la diferite fluxuri de iluminare sau lumină corespunde părților CVC situate în al patrulea cadran (Fig) Punctele de intersecție ale CVC cu axa tensiunii corespund valorilor foto-EMF sau tensiunilor în circuit deschis la diferite niveluri de iluminare Pentru fotocelulele din siliciu, foto-EMF este de , , V Punctele de intersecție ale caracteristicilor I-V cu axa curentului corespund valorilor curenților de scurtcircuit, care depind de aria joncțiunii electrice redresoare a fotocelulei Prin urmare, fotocelulele sunt comparate și evaluate prin densitățile de curent de scurtcircuit Pentru fotocelulele din siliciu, densitatea curentului de scurtcircuit la expunerea medie la soare este de mA/cm În funcție de CVC la diferite niveluri de iluminare ale fotocelulei, puteți alege modul optim de funcționare a fotocelulei, adică rezistența optimă la sarcină, la care sarcina i se da cea mai mare putere Modul optim de funcționare al fotocelulei corespunde celei mai mari suprafețe) Subliniaritate Phc Caracteristicile luminii fotocelulei: în caz de scurtcircuit; - la ralanti un dreptunghi cu un vârf pe CVC pentru o iluminare dată (Fig) Pentru fotocelule de siliciu la sarcina optima, tensiunea la sarcina este de , , V, densitatea de curent prin fotocelula este de mA/cm Caracteristicile luminii unei fotocelule sunt dependențele foto-EMF și ale curentului de scurtcircuit de fluxul luminos sau de iluminarea fotocelulei (Fig caracteristicilor este asociată cu o scădere a înălțimii barierei de potențial în timpul acumularea unei încărcături în exces de electroni în regiunea η și găuri în regiunea p Caracteristica spectrală a unei fotocelule este dependența curentului de scurtcircuit de lungimea de undă a luminii incidente Caracteristicile spectrale ale fotocelulelor sunt similare cu caracteristicile spectrale ale fotodiodelor realizate pe baza aceluiași semiconductor Caracteristica spectrală maximă a fotocelulelor de siliciu corespunde aproape cu distribuția spectrală maximă a energiei luminii solare De aceea, celulele solare cu siliciu sunt utilizate pe scară largă pentru a crea celule solare Eficiența unei fotocelule este raportul dintre puterea maximă care poate fi obținută de la o fotocelulă și puterea totală a fluxului radiant incident pe suprafața de lucru a fotocelulei: L = Dpax// - coeficient în funcție de materialul și dimensiunile termistorului În cazul ionizării incomplete a impurităţilor şi a absenţei compensării V"AEP / (A), unde AEF este energia de ionizare a impurităților (donatori sau acceptori) Pentru un semiconductor compensat cu ionizarea incompletă a impurităților Bæk n/k (,) Cu propria conductivitate electrică B"A /(¿), ( ) unde A este banda interzisă a semiconductorului Partea principală a termistoarelor produse de industrie este formată din semiconductori de oxizi - oxizi ai metalelor din grupa de tranziție a tabelului lui D I Mendeleev (de la titan la zinc) Astfel de termistori sub formă de tije, tuburi, discuri sau plăci sunt obținute prin tehnologie ceramică, adică prin arderea pieselor de prelucrat la temperatură ridicată Conductivitatea electrică a semiconductorilor de oxid cu legături ionice predominante diferă de conductivitatea electrică a semiconductorilor covalenti Metalele din grupul de tranziție sunt caracterizate prin prezența unor învelișuri de electroni neumplute și valență variabilă Ca urmare, în timpul formării oxidului în anumite condiții (prezența impurităților, abaterea de la stoichiometrie), în aceleași poziții cristalografice apar ioni cu sarcini diferite Conductivitatea electrică a unor astfel de materiale este asociată cu schimbul de electroni între ionii vecini Energia necesară pentru un astfel de schimb scade exponențial odată cu creșterea temperaturii Ca urmare a modificării intensității schimbului

de electroni între ioni, dependența de temperatură a rezistenței termistorului dintr-un semiconductor de oxid are același caracter ca cel al termistorilor din semiconductori covalenti (Fig), dar coeficientul Factorul de sensibilitate la temperatură în acest caz reflectă o modificare a intensității schimbului de electroni între ioni și nu o modificare a concentrației purtătorilor de sarcină În oxizii de vanadiu V O și V O la temperaturi de transformare de fază (și - °C), se observă o scădere a rezistivității cu câteva ordine de mărime Acest fenomen poate, de asemenea Orez Temperatura caracteristică a unuia dintre termistori , , J k-i poate fi folosit pentru a crea termistori cu un coeficient mare de rezistență negativ de temperatură în domeniul de temperatură corespunzător transformării de fază Caracteristicile și parametrii termistorilor de încălzire directă Caracteristica temperaturii unui termistor este dependența rezistenței sale de temperatură Un exemplu de caracteristică de temperatură a unuia dintre termistori este prezentat în fig Rezistența nominală a unui termistor este rezistența acestuia la o anumită temperatură (de obicei °C) Termistorii sunt fabricați cu o abatere admisă de la rezistența nominală de ± , și % Rezistențele nominale ale diferitelor tipuri de termistoare variază de la câțiva ohmi la câteva sute de kilo-ohmi Coeficientul de sensibilitate la temperatură B este coeficientul exponentului de răspuns la temperatură a termistorului ( ) Valoarea acestui coeficient, care depinde de proprietățile materialului termistorului, este aproape constantă pentru un anumit termistor în domeniul de temperatură de funcționare și pentru diferite tipuri de termistori este în intervalul de la la K Coeficientul de sensibilitate la temperatură poate poate fi găsită experimental prin măsurarea rezistenței termistorului la temperaturile To și T conform formulei R= p(/?//?o) l/To- /T ' Coeficientul de temperatură al rezistenței unui termistor este o valoare determinată de raportul dintre modificarea relativă a rezistenței termistorului și modificarea temperaturii acestuia: ( ) Coeficientul de temperatură de rezistență depinde de temperatură, așa că trebuie înregistrat cu un indice care să indice temperatura la care apare această valoare Dependența coeficientului de temperatură al rezistenței de temperatură poate fi obținută folosind ecuațiile ( ) și ( ): TK ? = - V / T Valorile coeficientului de temperatură de rezistență la temperatura camerei a diferitelor termistoare sunt în intervalul - (, ,) IO- K- Factorul de disipare a termistorului H este numeric egal cu puterea disipată de termistor la o diferență de temperatură între termistor și mediu de K sau, cu alte cuvinte, egală numeric cu puterea Orez Trei tipuri de caracteristici statice IV ale termistorilor încălziți direct (linii continue) și hiperbolelor de putere egală (linii întrerupte) cantitatea de energie care trebuie eliberată în termistor pentru a-l încălzi cu K Caracteristica curent-tensiune statică a unui termistor este dependența căderii de tensiune pe termistor de curentul care trece prin acesta în condiții de echilibru termic între termistor și mediu Pe fig prezintă caracteristicile statice IV ale termistorilor Liniaritatea caracteristicilor la curenți și tensiuni scăzute se explică prin faptul că puterea eliberată în termistor este insuficientă pentru o schimbare semnificativă a temperaturii acestuia Odată cu o creștere a curentului care trece prin termistor, puterea eliberată în acesta îi ridică temperatura Astfel, rezistența termistorului este determinată de temperatura totală - temperatura ambiantă și temperatura de supraîncălzire a termistorului La acești curenți, rezistența termistorului scade odată cu creșterea curentului și a temperaturii în

conformitate cu ( ), liniaritatea caracteristicii statice I-V este încălcată Cu o creștere suplimentară a curentului și a sensibilității la temperatură ridicată a termistorului, este dată o secțiune descendentă a caracteristicii statice I-V, adică o scădere a tensiunii pe termistor cu o creștere a curentului care trece prin acesta Puterea disipată în termistor crește continuu odată cu creșterea curentului care trece prin termistor, în ciuda scăderii tensiunii pe termistor Ca rezultat, hiperbolele de putere egală intersectează caracteristica statică I-V a termistorului într-un singur punct (Fig) Pentru fiecare punct al caracteristicii statice I-V a termistorului, este valabilă ecuația de echilibru termic dintre puterea eliberată în termistor datorită curentului care trece și puterea pe care o disipă în mediu: U*/R=I R = H(T-Hocr), (,) unde T este temperatura termistorului; HOkr - temperatura ambiantă Din ecuația ( ), ținând cont de ( ), se pot obține ecuațiile CVC static al termistorului într-o formă parametrică: u = y/nya^m-mtr) exp £ ; I) /= /^(G Tacr) exp (- f ( ) Tipul de caracteristică I-V statică a termistorului este determinat de coeficientul de disipare R, coeficientul de sensibilitate la temperatură B, rezistența nominală a termistorului și temperatura ambiantă Deci, atunci când factorul de disipare H scade (de exemplu, când presiunea aerului din jurul termistorului scade), termistorul se încălzește mai intens și, în consecință, aceleași temperaturi sunt atinse la puteri mai mici eliberate în termistor în timpul trecerii curentului, adică, caracteristica statică I-V se deplasează în jos (în regiunea tensiunilor mai mici) Odată cu creșterea temperaturii ambiante, rezistența termistorului scade, maximul caracteristicii statice I-V scade, iar abruptul acestuia scade Această dependență este utilizată în sistemele automate de control și reglare a temperaturii O creștere a coeficientului de sensibilitate la temperatură B duce la o deplasare a maximului caracteristicii statice I-V către puteri mai mici, iar abruptul secțiunii incidente crește Investigam ecuația ( ) pentru maximul funcției, presupunând că coeficientul de sensibilitate la temperatură și coeficientul de împrăștiere sunt constante Pentru a face acest lucru, echivalăm prima derivată a tensiunii față de curent cu zero În legătură cu forma parametrică a CVC, în acest caz, derivata tensiunii în raport cu variabila auxiliară, adică în raport cu parametrul T, înmulțim cu derivată de temperatură în raport cu curentul și echivalează produsul rezultat cu zero: dU dU dT dl dT dl Drept urmare, obținem TU ext BT și ext + B 'ocr= ; (,) de aici Tu extra = (,) Ecuația ( ) implică: Caracteristica statică I-V a termistorului va avea valori extreme de tensiune (curba din Fig) numai în condiția B> Gocr (,) Există două soluții care corespund tensiunii maxime și minime pe termistor Cu toate acestea, la o tensiune minimă pe termistor, temperatura acestuia se dovedește a fi mai mare decât cea permisă, adică practic, tensiunea minimă este în afara intervalului de temperatură de funcționare a termistorului Temperatura și, prin urmare, rezistența termistorului la valori extreme de tensiune, este determinată numai de valorile lui V și Tacr Temperatura termistorului la tensiuni extreme este independentă, de exemplu, de factorul de disipare Prin urmare, maximele (și minimele) caracteristicilor statice I-V ale unui termistor plasat în medii diferite ar trebui respectate la aceleași rezistențe ale termistorului Factorul de disipare afectează numai valorile tensiunii și curentului în punctul de maxim (și minim) al CVC static, care rezultă din ecuațiile ( ) și ( ) Temperatura maximă admisă a termistorului este temperatura la care nu au avut loc încă modificări ireversibile ale parametrilor și caracteristicilor

termistorului Temperatura maximă admisă este determinată nu numai de proprietățile materiilor prime ale termistorului, ci și de caracteristicile sale de proiectare Puterea de disipare maximă admisă a termistorului este puterea la care termistorul, situat în aer nemișcat la o temperatură de ° C, este încălzit prin trecerea curentului la temperatura maximă admisă Atunci când temperatura mediului ambiant scade, precum și atunci când termistorul funcționează în medii care asigură o mai bună disipare a căldurii, puterea disipată poate depăși valoarea maximă admisă Factorul de sensibilitate la energie al termistorului G este numeric egal cu puterea care trebuie furnizată termistorului pentru a-i reduce rezistența cu % Coeficient sensibilitatea la energie este legată de coeficientul de împrăștiere și de coeficientul de rezistență la temperatură prin relație g=///tkæ Valoarea coeficientului de sensibilitate la energie depinde de modul de funcționare al termistorului, adică este diferit în fiecare punct al CVC static Constanta de timp a termistorului este timpul în care temperatura termistorului scade cu % (e ori) în raport cu diferența de temperatură dintre termistor și mediu (de exemplu, la transferul termistorului dintr-un mediu de aer cu o temperatură de °C) °C într-un mediu aerian cu o temperatură de °C) Inerția termică a termistorului, caracterizată prin constanta de timp, este determinată de proiectarea și dimensiunile termistorului și depinde de conductibilitatea termică a mediului în care se află termistorul Pentru diferite tipuri de termistori, constanta de timp variază de la , la s § BOLOMETERE Un bolometru constă de obicei din două termistoare de peliculă (până la µm grosime) Unul dintre termistorii bolometrului este activ, adică este expus direct la radiația măsurată Rezistența acestui termistor se modifică ca urmare a încălzirii atunci când este iradiat cu radiații electromagnetice în domeniul de frecvență optică sau infraroșu Al doilea termistor - compensare - este utilizat pentru a compensa eventualele modificări ale temperaturii ambiante Termistorul de compensare trebuie să fie protejat de radiația măsurată Termistorii activi și de compensare sunt plasați într-o carcasă ermetică Bolometrele au de obicei trei cabluri externe: de la termistorii activi și de compensare și de la punctul de mijloc Pentru caracterizarea bolometrelor se folosesc următorii parametri:) rezistența termistorului activ al bolometrului la temperatura camerei;) tensiune de operare;) sensibilitatea la o anumită frecvență de modulare a fluxului radiant, egală cu raportul dintre semnalul util preluat de la bolometru la intrarea amplificatorului și puterea radiației incidente pe bolometru;) pragul de sensibilitate, numeric egal cu puterea de radiație care provoacă un semnal echivalent cu nivelul de zgomot intrinsec al bolometrului, adică pragul de sensibilitate este determinat de puterea minimă de radiație pe care bolometrul este capabil să o înregistreze în condiții date;) de către constantă de timp care caracterizează inerția termică a termistorului activ;) nivelul de zgomot propriu Bolometrele cu semiconductor sunt utilizate în diverse sisteme de orientare, pentru măsurători de temperatură fără contact și la distanță etc § TERMISTORI PENTRU ÎNCĂLZIRE INDIRECTĂ Un termistor de încălzire indirectă este un termistor care are o sursă de căldură suplimentară - un încălzitor Designul termistorilor încălziți indirect poate fi diferit Adesea, încălzitorul este realizat sub forma unei înfășurări pe un tub izolator, în interiorul căruia se află termistorul În alte cazuri, termistorul în sine este realizat sub formă de tub, în interiorul căruia trece un fir de încălzire Comun tuturor Orez Caracteristicile statice IV ale termistorului de încălzire

indirectă la diferiți curenți prin încălzitor Orez Caracteristica de încălzire a termistorului de încălzire indirectă designul termistorilor de încălzire indirectă este că au două circuite izolate electric unul de celălalt: control și controlat Pe lângă parametri precum rezistența nominală și coeficientul de sensibilitate la temperatură, termistorii încălziți indirect au propriile caracteristici și parametri specifici Caracteristicile static curent-tensiune ale termistorului de încălzire indirectă sunt date pentru diverși curenți prin încălzitor (Fig) Caracteristica de încălzire este dependența rezistenței termistorului încălzit indirect de puterea eliberată în spirala înfășurării de încălzire (Fig) Pentru a obține cea mai mare sensibilitate a termistorului de încălzire indirectă, adică cea mai mare modificare a rezistenței Cu toate acestea, ar trebui utilizat în moduri în care puterea eliberată în elementul sensibil la temperatură însuși de curentul care trece prin acesta ar putea fi neglijată Coeficientul de cuplare termică este raportul dintre puterea Pt necesară pentru a încălzi elementul sensibil la o anumită temperatură în timpul încălzirii directe și puterea Rpod necesară pentru a încălzi la aceeași temperatură în timpul încălzirii indirecte, adică prin trecerea curentului prin încălzitor ! K == Pm/Pnoj\' De obicei, pentru a determina coeficientul de cuplare termică, un termistor încălzit indirect este încălzit la așa-numita rezistență la cald a termistorului la puterea maximă disipată în încălzitor Coeficientul de cuplare termică este de obicei , , , adică mai mic decât unitatea, deoarece o parte din căldura eliberată de încălzitor se pierde inevitabil Constante de timp Inerția termică a termistorilor încălziți indirect este caracterizată de două constante de timp Prima constantă de timp este considerată timpul în care temperatura elementului sensibil la temperatură se modifică cu un factor de e în raport cu valoarea în regim permanent cu o schimbare instantanee a puterii în circuitul de încălzire A doua constantă de timp caracterizează întârzierea modificării temperaturii elementului sensibil la temperatură în raport cu modificarea temperaturii încălzitorului Astfel, prima constantă de timp caracterizează inerția termică a întregului design al termistorului încălzit indirect; a doua constantă de timp este inerția termică a elementului sensibil la temperatură § POZITORI Un pozistor este un termistor semiconductor cu un coeficient de rezistență pozitiv la temperatură În producția de masă, pozistorii sunt fabricați pe bază de ceramică de titanat de bariu Titanatul de bariu $BaTiO_3$ este un dielectric cunoscut încă de la începutul anilor ai secolului nostru, cu o rezistență specifică la temperatura camerei de IO IO Ohm-cm, care depășește semnificativ rezistivitatea semiconductorilor Dacă, totuși, se introduc în compoziție impurități din elemente de pământuri rare (lantan, ceriu etc) sau alte elemente (niobiu, tantal, antimoniu, bismut etc) care au o valență mai mare decât cea a titanului și o rază ionică a ceramicii de titanat de bariu, aproape de raza ionului de titan, aceasta va duce la o scădere a rezistivității la IO Ohm-cm, ceea ce corespunde rezistivității materialelor semiconductoare (Fig) Titanatul de bariu semiconductor are o dependență anormală de temperatură a rezistivității: într-un interval de temperatură îngust atunci când este încălzit deasupra Orez Dependența rezistivității titanatului de bariu de concentrația diferitelor impurități: - neodim; - ceriu, lantan, niobiu; - ytriu punctul Curie, rezistivitatea titanatului de bariu semiconductor crește cu câteva ordine de mărime Mecanismul conductivității electrice a titanatului de bariu semiconductor în prezența impurităților poate fi reprezentat după cum

urmează Un amestec de un element de pământ rar (de exemplu, lantan) înlocuiește bariul la locul rețelei cristaline Unii dintre atomii de titan, menținând neutralitatea electrică a întregului cristal, captează electronii de valență suplimentari ai lantanului, care are o valență mai mare decât bariul Electronii capturați, fiind într-o stare cvasi-stabilă, se mișcă ușor schayutsya sub acțiunea unui câmp electric și determina conductivitatea electrică a materialului Acest lucru poate fi ilustrat prin următoarea formulă: Ba +Ti +OG xLa + (Baî±xLax+) (Tif+xTi +)Oh Când înlocuiți titanul în titanat de bariu cu impurități ale altui element (de exemplu, atomii de tantal), un proces similar de conductivitate electrică poate fi reprezentat după cum urmează: Ba +Ti +O + xTa + -> Ba +(Tií± xTi +Ta^+)OÍ- Proprietățile semiconductoare ale ceramicii pe bază de titanat de bariu pot fi obținute și prin metoda reducerii parțiale: Ba +Ti +Oz" - xO - -> Ba +(Tii± xT¡ ¿)O ^x În toate aceste cazuri, există ioni de titan tetravalent și trivalent în titanatul de bariu semiconductor Un schimb de electroni poate avea loc între ionii de titan cu valență diferită În același timp, se răsucește fie cu trei, fie cu patru valențe (Fig) Acest proces este responsabil pentru conductivitatea electrică a semiconductorului titanat de bariu Apariția proprietăților semiconductoare în cristalele ionice sub influența impurităților se observă și pentru oxidul de nichel Semiconductorii realizati în acest fel sunt uneori denumiți semiconductori controlați de valență Tehnologia de fabricație fiecare ion de titan a devenit La ba * βαO β Orez Dependențe calculate ale coeficientului de neliniaritate al varistoarelor din materiale cu diferite valori ale coeficientului de sensibilitate la temperatură B: a - de la tensiune; b - asupra temperaturii regiunii active X) Apoi, ținând cont de relațiile ( ) și ( ), coeficientul de neliniaritate al varistorului o R T + VT-VTO r G t -VT + VT ■ (H) Pe fig arată dependențele calculate ale coeficientului de neliniaritate de tensiunea și temperatura regiunilor active ale varistoarelor din materiale cu diferite valori ale coeficientului de sensibilitate la temperatură B a straturilor de suprafață ale cristalelor Pentru a determina poziția maximelor acestor dependențe, diferențiam ( ) în raport cu temperatură și echivalăm derivata cu zero Apoi obținem condiția T= T , în care coeficientul de neliniaritate are o valoare maximă: Gură Go + V Go-V * ( ) Din relația ( ) rezultă că la B T , atunci varistorul ar trebui să aibă o rezistență diferențială negativă, coeficientul de neliniaritate va fi și el negativ Pe baza acestor calcule (Fig), se poate concluziona că temperatura regiunilor active ale varistorului poate depăși temperatura mediului cu câteva sute de grade Prin urmare, pentru fabricarea varistoarelor cu parametri stabili, este necesar un material rezistent la căldură De aceea, carbura de siliciu, unul dintre cele mai rezistente la căldură, este folosită în producția de masă a varistoarelor În același timp, carbura de siliciu policristalină este foarte ieftină material Principalele impurități din carbura de siliciu tehnică sunt azotul și aluminiul Energia de ionizare a acestor impurități din carbura de siliciu este scăzută (mai ales la o concentrație mare impuritățile principale și compensatoare, care au loc în carbură de siliciu tehnică), valoarea coeficientului de sensibilitate la temperatură B este în mod corespunzător mică De aceea, coeficientul de neliniaritate al varistoarelor nu depășește , ceea ce limitează posibilele aplicații ale varistorilor O creștere a temperaturii ambiante ar trebui să conducă la o scădere a coeficientului de neliniaritate ( ) și o ușoară deplasare a maximului curbei β = /(¿/) în tensiune (Fig) Caracteristici volt-amper Orez

Dependența calculată a coeficientului de neliniaritate varistorului de tensiunea la diferite temperaturi (V = K) Varistorul, după cum sa menționat, trebuie să respecte ecuațiile ( ) și ( ) Dacă varistorul funcționează într-un interval îngust de tensiune și curent se modifică, atunci coeficientul de neliniaritate din acest interval poate fi considerat constant: β = Udì/(ìdU} = const ' Apoi \dI/¡ = ^dU/U; η/ = β η í/+ log Λ iar BAX al varistorului va corespunde ecuației I = AU^ ,(-) unde A este un coeficient, a cărui valoare depinde de tipul de varistor și de temperatură Uneori, caracteristicile I-V ale varistoarelor sunt aproximate prin ecuație U = Ai/a , ( ) unde a = l/β şi A\ = A~v/β = A~a Folosind ecuațiile ( ) și ( ), rezistența statică a unui varistor poate fi exprimată în funcție de curent sau tensiune: R(J) = AiI^-'; ( ) R(U) = AW'-fi ( ) Coeficienții de temperatură de rezistență statică, tensiune și curent În legătură cu neliniaritatea caracteristicilor IV, ar trebui să se facă distincția între coeficienții de temperatură ai rezistenței statice a varistorului, măsurați la tensiune sau curent constant, precum și coeficienții de temperatură ai tensiunii și curentului Din ecuațiile ( ) - ( ), ținând cont de modificarea temperaturii coeficienții A și Ai obținem: TK/?k/=const = ' ,= R (j¡ lL/=const = TK t + (il)TK/h=const; ( ) (tm)l/=const - -R ~dȚ I / = const = = βTKΛι + (- p)TK /|/=const ; ( ) = j>L=const = -βTKΛ ; ( ) TKt/^eons^^L^(tm) ( ) La tensiuni joase pe varistor, când coeficientul de neliniaritate β = , adică în secțiunea liniară a caracteristicii I-V TK , = ^-^=TK/?bœo = -^· ( ) Folosind ecuațiile ( ) - ( ), determinăm relația dintre diferiții coeficienți de temperatură ai varistorului: TK/?k=const = βTK/? I/ =const " TK/|í/=co^st = -βTKí/Uconst Pentru varistoarele produse de industria autohtonă, în intervalul de temperatură de la - la - ° C -TK/?b=const = TK/k=const TQ (vezi §) În legătură cu analogia principiilor de funcționare a comutatoarelor bazate pe semiconductori și termistori amorfi, caracteristica I-V a comutatorului poate fi aproximată prin același sistem de ecuații ( ) și ( ) Diferența dintre mecanismele de funcționare a comutatoarelor și termistorilor este asociată cu un volum mult mai mic al zonei încălzite din pelicula amorfă a comutatorului - un canal sau un cablu conductiv format în timpul dantelării curente (vezi §) Canalul conductiv apare înainte de trecerea dispozitivului în starea deschisă și, datorită încălzirii, are o conductivitate specifică mai mare decât restul părții pasive a peliculei semiconductoare amorfe Prin urmare, mărimile incluse în ecuațiile ( ) și ( ) sunt parametrii unui canal conducător într-un film semiconductor amorf, adică H este coeficientul de împrăștiere al canalului conductor; T este temperatura canalului conductor; /? "> - coeficient în funcție de aria secțiunii transversale a canalului conductor, grosimea filmului semiconductor amorf și proprietățile sale; B este coeficientul de sensibilitate la temperatură al semiconductorului amorf În starea deschisă a comutatorului, adică cu o rezistență scăzută a canalului conductiv, este, de asemenea, necesar să se ia în considerare rezistența la răspândire în substratul de grafit sub canalul conductiv Deci, cu rezistența specifică a grafitului ρ = , Ohm-cm și raza secțiunii transversale a canalului conductor r = μm, rezistența la răspândire Rs în substratul de grafit, calculată prin formula ( ), este de Ohm O astfel de rezistență poate afecta în mod semnificativ caracteristica I-V a comutatorului în stare deschisă Luând în considerare căderea de tensiune pe rezistența de împrăștiere, caracteristica I-V a comutatorului trebuie să corespundă ecuației t/ = /i/?D '- 'o)expu-+ RSI Rezultatele unui calcul numeric folosind această ecuație arată că

valorile curentului și temperaturii canalului conductor la tensiunea minimă pe comutator în stare deschisă depind în mare măsură de valoarea rezistenței de răspândire în grafit substrat De exemplu, fără a lua în considerare rezistența de răspândire, valorile calculate ale curentului și temperaturii la tensiunea minimă se dovedesc a fi mA și, respectiv, K, ceea ce este nerealist și nu corespunde valorilor experimentale Luând în considerare rezistența de răspândire (Rs = Ohm), aceleași valori sunt egale cu , mA și K, ceea ce este destul de acceptabil În calculele din acest exemplu, B = K, //Roo = , - - Ohm-W-K- Conductivitatea specifică a canalului conductor încălzit depășește conductivitatea specifică a restului părții pasive a filmului semiconductor amorf Cu toate acestea, aria secțiunii transversale a canalului conductor este cu câteva ordine de mărime mai mică decât aria părții pasive a filmului semiconductor amorf dintre electrozi Prin urmare, conductivitatea totală a părții pasive a filmului poate fi mai mare decât valoarea absolută a caracteristicii de conductivitate diferențială a secțiunii de tranziție a CVC a canalului conductor În acest caz, comutatorul va avea așa-numitul CVC în formă de y (vezi §) Astfel, comutatoarele bazate pe semiconductori amorfi pot avea caracteristici curent-tensiune în formă de y, care la prima vedere contrazic mecanismul de comutare termică Secțiunea de tranziție a caracteristicii I-V în formă de y nu poate fi investigată experimental punct cu punct, chiar și atunci când se utilizează un generator de curent ideal ca sursă de energie, adică o sursă de putere cu o rezistență proprie infinit de mare Caracteristici și proprietăți Tensiunea de comutare este tensiunea minimă la care comutatorul comută de la închis la deschis Pentru diferite comutatoare bazate pe semiconductori amorfi, tensiunea de comutare variază de la unități la zeci de volți Tensiunea de comutare a comutatoarelor pe semiconductori amorfi scade odată cu creșterea temperaturii ambiante, la fel ca și tensiunea de defalcare în timpul defecțiunii termice (vezi §) Cu toate acestea, la comutatoarele cu o grosime mică a filmului semiconductor amorf (mai mulți micrometri), defalcarea termică poate fi precedată de o avalanșă din cauza intensității ridicate a câmpului electric Tensiunea de avarie în timpul avalanșei crește odată cu creșterea temperaturii ambientale (vezi §) Prin urmare, comutatoarele cu o peliculă subțire de semiconductor amorf pot avea o dependență complexă a tensiunii de comutare de temperatură Cu toate acestea, mecanismul de trecere de la starea închisă la cea deschisă este asociat doar cu defalcarea termică Curentul de rupere este curentul minim la care comutatorul este încă deschis Când comutatorul este acționat la tensiune alternativă sau în modul pulsat, este necesar să se țină cont de inerția procesului de încălzire și răcire a canalului conductor Curentul prin comutator, în funcție de temperatura canalului conductor, va întârzia în raport cu tensiunea aplicată, adică va fi defazat Cu toate acestea, constantele de timp termic, datorită volumului mic al canalului conducător, se dovedesc a fi, de asemenea, foarte mici (IO-IO- s) În consecință, comutatoarele bazate pe semiconductori amorfi pot funcționa la frecvențe de până la zeci și uneori sute de megaherți Timpul de comutare este afectat de capacitatea proprie a comutatorului și de capacitatea elementelor de circuit externe La trecerea dispozitivului de la o stare închisă la una deschisă, descărcarea propriei sale capacități și capacități conectate în paralel cu comutatorul are loc prin canalul conductiv, accelerând încălzirea acestuia și reducând astfel timpul de comutare § ELEMENTE DE MEMORIE PE SEMICONDUCTOARE AMORFICE Elementele de memorie bazate pe semiconductori

amorfi au același design ca și comutatoarele, dar paharele de calcogenură sunt de obicei folosite ca semiconductor amorf a sistemului Te iGeisX , unde X sunt ioni de arsen, sulf sau antimoniu Acești compuși, atunci când sunt răciți relativ lent în intervalul de temperatură de înmuiere, au tendința de a cristaliza, iar atunci când sunt răciți rapid la temperaturi sub temperaturile de înmuiere, se dovedesc a fi într-o stare amorfă Conductivitatea specifică a unui semiconductor în stare policristalină este cu câteva ordine de mărime mai mare decât conductivitatea specifică a aceluiași semiconductor în stare amorfă Prin urmare, elementul de memorie are două caracteristici I-V corespunzătoare stărilor deschis (rezistență scăzută) și închis (rezistență ridicată) (Fig) Ambele stări ale elementului de memorie sunt păstrate după deconectarea acestuia de la sursa de alimentare, adică un astfel de dispozitiv este nevolatil acest element al memoriei Mecanismul de comutare al elementului pa- O schimbare de la o stare închisă la una deschisă, precum și la comutatoarele bazate pe semiconductori amorfi, este asociată cu încălzirea unui cablu sau a unui canal conductiv în timpul defalcării termice a semiconductorului, adică la o tensiune de comutare Pentru a "aminti" starea deschisă, este necesar ca, în timpul perioadei de răcire după oprirea curentului, materialul cablului să aibă timp să se cristalizeze parțial sau complet Cristalizarea va avea loc dacă, în primul rând, temperatura din cordon depășește temperatura de cristalizare Orez CVC al unui dispozitiv de memorie pe un semiconductor amorf (element de memorie) În al doilea rând, nu numai cablul, ci și zonele din jur ar trebui încălzite Abia atunci timpul de răcire al cordonului va fi suficient pentru cristalizare Pentru a îndeplini aceste condiții, impulsul de curent care transferă elementul de memorie din starea închisă în cea deschisă trebuie să aibă o amplitudine mai mare de , mA și o durată mai mare de IO- s Pentru a transfera un element de memorie dintr-o stare deschisă la o stare închisă, este necesar să încălziți cablul cristalizat la temperatura de topire cu un alt impuls de curent și apoi să-l răciți rapid la temperatura de tranziție sticloasă Astfel de condiții vor fi îndeplinite dacă un impuls de curent de foarte scurtă durată (IO- IO- s) este trecut prin elementul de memorie în stare deschisă În timpul acțiunii unui impuls scurt, numai cablul va fi încălzit Răcirea acestuia după acțiunea pulsului se va produce rapid și materialul filamentar nu va avea timp să se cristalizeze Dar pentru a atinge temperatura de topire, amplitudinea impulsului de curent pentru majoritatea elementelor de memorie trebuie să fie de cel puțin mA Informațiile (zero logic sau unu logic) stocate într-un element de memorie pot fi citite folosind impulsuri de putere redusă Aceste impulsuri nu ar trebui să conducă la crește tensiunea pe elementul de memorie la tensiunea de comutare, dacă este în stare închisă și nu ar trebui să creeze curenti prin elementul de memorie care să-l transfere din starea deschisă în starea închisă § FIABILITATE, STABILITATEA ȘI DURATA DE UTILIZARE A DISPOZITIVELOR PE SEMICONDUCTOARE AMORFICE Fiabilitatea, stabilitatea și durata de viață a dispozitivelor semiconductoare amorfe sunt destul de scăzute în comparație cu alte dispozitive semiconductoare Acești parametri sunt deosebit de mici atunci când curentul trece prin dispozitive pe semiconductori amorfi într-o singură direcție Instabilitatea se manifestă de obicei printr-o scădere a tensiunii de comutare în timp și cu trecerea unui dispozitiv semiconductor amorf la o stare de memorie, adică la o stare deschisă cu efect de memorie Acest fenomen este asociat cu cristalizarea treptată a unui semiconductor amorf în canalul conductor, care are loc cu cât mai

repede, cu atât temperatura și intensitatea câmpului în canalul conductiv sunt mai mari În aceste condiții, sunt facilitate deplasarea ionilor semiconductori amorfi în canalul conductor și rearanjarea lor, care favorizează cristalizarea Numărul de operațiuni de comutare pe care le poate rezista un comutator depinde de curentul care curge prin comutatorul deschis și de durata acelui flux de curent Cu cât este mai mare amplitudinea și durata impulsurilor de curent, cu atât numărul de comutări este mai scurt rearanjarea ionilor în canalul conductor, ceea ce duce la cristalizarea unui semiconductor amorf în acesta Numărul maxim de comutări pe care comutatorul le poate rezista înainte de a eșua este IO IO Pentru a estima corect un astfel de număr aparent mai mare de operațiuni de comutare, este necesar să se țină cont de faptul că timpul de disipare al tranzistoarelor moderne poate fi de doar câteva nanosecunde Aceasta înseamnă că un tranzistor care funcționează într-un circuit comutator poate face mai mult de comutații IO în cel puțin câteva ore Astfel, durata scurtă de viață a dispozitivelor bazate pe semiconductori amorfi, asociată cu componenta ionică relativ mare a conductibilității acestor materiale la temperaturi ridicate, pune la îndoială perspectivele acestora și limitează semnificativ aplicațiile acestora Pentru a crește stabilitatea parametrilor comutatoarelor, fiabilitatea acestora și numărul de operațiuni înainte de defecțiune, este necesar să se utilizeze materiale semiconductoare cu un coeficient de sensibilitate ridicat la temperatură (B> T) și unul temporar cu un punct de topire sau de înmuiere mai mare, cu o componentă ionică mai mică de conductivitate Caracteristicile pozitive ale dispozitivelor bazate pe semiconductori amorfi sunt ușurința lor de fabricare și rezistența ridicată la radiațiile penetrante Întrebări de control capitol Dispozitive termoelectrice semiconductoare § PRINCIPIUL DE PROIECTARE ȘI OPERARE În dispozitivele termoelectrice semiconductoare se folosesc termoelemente semiconductoare, fiecare dintre ele constând din două ramuri cu un tip diferit de conductivitate electrică Ramura termoelementului, al cărei material are conductivitate electrică de tip p, se numește ramura pozitivă Ramura termoelementului cu conductivitate electrică de tip n este ramura negativă Ramurile pozitive și negative ale termoelementului semiconductor sunt conectate în serie între ele printr-o placă de contact (Fig) Zona de conectare electrică a ramurilor unui termoelement semiconductor se numește joncțiune În timpul funcționării unui termoelement, joncțiunile sale au temperaturi diferite: una dintre ele este de absorbție a căldurii, cealaltă este de eliberare de căldură Un dispozitiv termoelectric semiconductor are, de obicei, un număr mare de termoelemente conectate în serie între ele într-un singur design - un termopil semiconductor Un dispozitiv termoelectric semiconductor care include unul sau mai multe componente electrice termopilul semiconductor conectat într-un singur design cu un sistem de schimb de căldură se numește unitate termoelectrică semiconductoare Orez Schema unui termoelement semiconductor cu rezistență la sarcină: / - ramură pozitivă; - ramură negativă; - contact metalic - farfurii Apariția termo-EMF (efectul Seebeck) Dacă există o diferență de temperatură între joncțiunile dintr-un circuit cu un termoelement, apare o forță termoelectromotoare (termo-EMF), care este formată din trei componente Prima componentă a termo-EMF se datorează difuzării purtătorilor de sarcină dintr-o joncțiune încălzită, a cărei temperatură, datorită puterii termice furnizate de la o anumită sursă, este mai mare decât temperatura joncțiunii generatoare de căldură Difuzia purtătorilor de sarcină în picioarele unui termoelement poate avea loc din două motive În primul rând, în

picioarele termoelementului de lângă joncțiunea încălzită, există un număr mai mare de impurități ionizate Odată cu ionizarea suplimentară a impurităților, crește concentrația purtătorilor de sarcină principali la capetele încălzite ale picioarelor termoelementului În acest caz, difuzia purtătorilor principali are loc în fiecare ramură a termoelementului datorită gradientului de concentrație (Fig) În al doilea rând, dacă toate impuritățile din picioarele termoelementului au fost deja ionizate la o temperatură scăzută (această temperatură este mai mare decât temperatura de epuizare a impurităților), atunci concentrația purtătorilor principali de sarcină în timpul încălzirii practic nu crește Dar la capetele încălzite ale picioarelor termoelementului, purtătorii de sarcină dobândesc energii mari Prin urmare, difuzia purtătorilor de sarcină principali de la capătul încălzit are loc din nou în fiecare ramură a termoelementului, asociată cu egalizarea energiei medii pe purtător de un anumit semn Difuzia, de exemplu, a electronilor în ramura negativă poate avea loc numai de la capătul încălzit al acestei ramuri de-a lungul acesteia și nu poate avea loc în ramura pozitivă, deoarece tranziția electronilor în ramura pozitivă este împiedicată de bariera de potențial a joncțiunii încălzite a termoelementului De asemenea, găurile din ramura pozitivă pot difuza de-a lungul acesteia de la capătul încălzit Mișcarea purtătorilor de sarcină, asociată cu difuzia lor, încalcă neutralitatea electrică în picioarele termoelementului - atomii de impurități ionizate necompensate rămân la capetele încălzite ale picioarelor termoelementului și la contra- Ί P τ± o (c)o(c) oof(c)o Λ OO°OOθ°OOoθ ? A) OO(c)OQ(c)O(c) oofofro ooo Ti O (c)e(c) (c)*(c) (c) (c)*(c) - O Ó(c) (c)*(c)(c)*(c)*(c) c) I-* * · * *- r Orez Apariția termo-EMF ca urmare a difuzării purtătorilor de sarcină de-a lungul ramurilor termoelementului: a - joncțiunile termoelementelor sunt la aceeași temperatură T\ (nu toți donatorii și acceptorii sunt ionizați); b - diagrame energetice ale ramurilor termoelementului în starea de echilibru termodinamic (la Γi); (c) joncțiunile termoelementelor sunt la temperaturi diferite (în apropierea joncțiunilor încălzite, toate impuritățile sunt ionizate); d - diagrame energetice ale picioarelor termoelementului la rezistența de sarcină /?n = (există un curent egal cu curentul de scurtcircuit al termoelementului); e - diagrame de energie cu rezistență la sarcină /? n \u d oo (a apărut EMF termică) la capetele pozitive se formează un exces de purtători principali de sarcină Ca urmare, apare prima componentă a termo-EMF, care poate fi numită difuzie, deoarece apare din cauza proceselor de difuzie A doua componentă a termo-EMF este o consecință a dependenței de temperatură a diferenței de potențial de contact Dacă ambele joncțiuni ale termoelementului au aceeași temperatură, atunci contactul Orez Apariția fepMO-EMF datorită dependenței de temperatură a diferenței de potențial de contact în cazul unui scurtcircuit al picioarelor termoelementului și diagramelor energetice ale joncțiunilor la diferite temperaturi Diferențele de potențial la aceste joncțiuni sunt egale, direcționate în direcții opuse la ocolirea circuitului cu un termoelement și nu dau EMF rezultat Dacă temperatura joncțiunilor termoelementelor este diferită, atunci valoarea diferenței de potențial de contact pe joncțiuni va fi și ea diferită (Fig) Apoi, a doua componentă termo-EMF apare în circuitul termoelementului cu aceeași polaritate ca prima componentă A treia componentă a termo-EMF apare într-un termoelement datorită antrenării purtătorilor de sarcină de către cuantele de energie termică - fononi Dacă există un gradient de temperatură în ramurile termoelementului, atunci va exista o mișcare direcționată a

fononilor de la capetele încălzite ale ramurilor Ca urmare a ciocnirii fononilor cu purtătorii de sarcină, fononii transportă electroni în ramura negativă și găuri în ramura pozitivă Acest efect poate fi predominant la temperaturi scăzute Termo-EMF rezultat, format din cele trei componente considerate, depinde de diferența de temperatură dintre joncțiunile termoelementelor și de proprietățile electrofizice ale materialelor semiconductoare care formează ramurile termoelementului Într-un interval mic de temperatură, termo-EMF poate fi considerat (cu suficientă precizie în scopuri practice) proporțional cu diferența de temperatură dintre joncțiunile termoelementelor și cu un anumit coeficient αι, ", numit coeficientul termo-EMF: £ = αί Δ \ (,) Absorbția și eliberarea căldurii în joncțiunile termocuplului (efectul Peltier) Când un curent continuu trece printr-un termoelement, joncțiunile acestuia absorb sau eliberează, în funcție de direcția curentului, o anumită cantitate de căldură proporțională cu timpul, curentul și coeficientul Peltier: Qn = = b P // (,) Dacă direcția curentului în circuitul cu termocupluri este cea prezentată în Fig , apoi pe joncțiunea , electronii liberi și găurile apărute ca urmare a generării termice se deplasează în direcții diferite sub acțiunea câmpului electric total (câmpul de difuzie al joncțiunii și câmpul exterior) În timpul generării termice a purtătorilor de sarcină în regiunea joncțiunii , un transfer de electroni de la o anumită energie termică a rețelei cristaline a semiconductorului este cheltuită în banda de conducție în banda de valență Prin urmare, pentru o direcție dată de curent, joncțiunea va fi răcită, în timp ce joncțiunea aceasta P R p + • • •o o oo o • • •- Gg^ se încălzește, deoarece electronii și găurile se apropie de el din părți diferite, care degajă o anumită energie sub formă de căldură în timpul recombinării Ca urmare, atunci când trece curentul, termoelementul funcționează ca un fel de pompă de căldură, preluând energie termică la joncțiunea (joncțiunea de absorbție a căldurii la o direcție dată de curent) și eliberând-o la joncțiunea (joncțiunea generatoare de căldură) Efectul Peltier este inversul efectului Seebeck Prin urmare, pentru același termoelement, există o relație cu coeficientul termo-EMF: Fig , Răcirea joncțiunii ( ) și încălzirea joncțiunii ( ) a termoelementelor semiconductoare în timpul trecerii diagramelor de curent și energie care explică aceste fenomene între coeficientul Peltier P , - " , ^ (,) Această relație poate fi obținută prin aplicarea primei și a doua legi ale termodinamicii la fenomenele termoelectrice § GENERATORE TERMOELECTRICE Eficiența termocuplului În conformitate cu scopul, unul dintre principalii parametri ai unui generator termoelectric este eficiența, adică raportul dintre puterea utilă eliberată în sarcina generatorului și cantitatea de căldură furnizată joncțiunilor de absorbție a căldurii pe unitatea de timp Să considerăm funcționarea unui termoelement separat ca un convertor de energie termică în energie electrică Dacă rezistențele specifice ale picioarelor termoelementului sunt ρι și Q , înălțimea curentă a piciorului este lungimea căii curentului în piciorul termoelementului I, secțiunea transversală curentă a picioarelor este secțiunea transversală a picioarelor termoelementului, determinată de-a lungul normala la liniile de curent vectoriale Si și S (vezi Fig), apoi termoelementul de rezistență totală /? = qU/Si + q Z/S (,) Rezistența tranzitorie a joncțiunilor picioarelor termoelementului cu plăci de contact metalice este neglijată în comparație cu rezistența picioarelor termoelementului Conductivitatea termică totală a unui termoelement poate fi exprimată în termeni de conductivitățile termice specifice ale ramurilor κι și xr* Λ = κι ι//+

x S /Z (,) Ca rezultat al procesului de conducere a căldurii, căldura este transferată de la joncțiunea care absorb căldură sau de la sursa de energie termică la joncțiunea de eliberare a căldurii pe unitate de timp Qk=K(, - Tι) (,) Folosind expresia ( ), pentru curentul care trece în circuitul termoelementului, scriem (') În același timp, puterea utilă este eliberată în sarcină p / p ai (н - Гi) /?н /inox P"-IR" (R^W ■· (m+i)T Primul factor din ( ) este randamentul unui motor termic reversibil, al doilea factor caracterizează scăderea randamentului datorită pierderilor ireversibile de conductivitate termică și căldură Joule în termoelement Produs K/? în numitorul ( ) depinde de parametrii materiale ai piciorului termoelementului ρι și ρ , κι și κ , precum și de secțiunile transversale curente ale picioarelor termoelementului S¡ și S [vezi ( ) și ( )] Pentru a asigura cea mai mare eficiență (pentru ramurile date T , Ί, a > , m, p și κ), este necesar să alegeți secțiunile curente ale ramurilor astfel încât produsul K/? a fost minim Pentru a face acest lucru, facem diferența QY = (K S + X S)(-^- + -g-) = + X)(-^- + ρ) ( ) în raport cu (Si/S) și echivalează derivata cu zero Funcția ( ) are o valoare minimă la raportul optim al secțiunilor curente ale ramurilor (Si/S)onT= }/ριX /(ρ Xι) ( ) în care (K/?)min = (/κïρί + /X P) (,) Valoarea α? /K/?, reciproca valorii incluse în numitorul expresiei ( ), ținând cont de raportul optim al secțiunilor curente ale ramurilor ( ), se notează de obicei cu Z și este numit factor de eficiență sau de calitate al termoelementului: Astfel, randamentul unui termoelement de dimensiune optima depinde de urmatorii factori:) randamentul termoelementului ta Z, determinată numai de parametrii electrofizici ai materialelor semiconductoare ale picioarelor termoelementului;) diferențele de temperatură ale joncțiunilor termoelementelor;) raportul dintre rezistența la sarcină și rezistența termoelementului Pentru a găsi eficiența maximă, este necesar să alegeți raportul optim dintre rezistența la sarcină și rezistența termoelementului Diferențiând expresia eficienței ( ) în raport cu m și echivalând derivata la zero, obținem sus = = / + ZT ,(,) unde T \u d (T - T\) / - temperatura medie a "acțiunilor Înlocuind ( ) și ( ) în formula generală ( ), găsim valoarea maximă a randamentului termoelementului, care depinde numai de temperatura joncțiunilor și de randamentul termoelementului: T]max Γ Ί '"pe: - PT GPopt + T !T (,) Din relațiile ( ) și ( ) se poate observa că la anumite temperaturi T și T\ și la Z->oo, randamentul maxim tinde spre randamentul unui motor termic ideal (ciclul Carnot): Totuși, pentru a aproxima eficiența maximă a unui termoelement cu eficiența unui motor termic ideal, este necesară o valoare mare a eficienței termoelementului Z Este adesea necesar să obțineți putere maximă de la un termocuplu chiar și în detrimentul eficienței În acest mod de funcționare, rezistența de sarcină trebuie să fie egală cu rezistența termocuplului, adică de ex RH/R = m=m în care la eu µv Z In-^- ak Astfel, pentru diferite contacte de ieșire, factorul de utilizare al traductoarelor Hall este proporțional cu pătratul mobilității purtătorilor de sarcină Curentul maxim admisibil Pentru a crește EMF Hall și puterea de ieșire, este necesar să creșteți puterea de intrare Când puterea furnizată convertorului Hall este egală cu puterea de disipare admisă, temperatura convertorului crește la maximul admis De aceea / max-^-=ȘSA '> ( ) unde S este aria suprafeței traductorului Hall; β este coeficientul de transfer termic; ΔT este diferența de temperatură dintre temperatura maximă admisă și cea ambientală Dacă neglijăm aria fețelor laterale și presupunem că S = al, atunci, pe baza ecuației de echilibru termic ( ), curentul maxim admis prin convertorul

Hall /max=a ^βΔTδ/ρ (,) Conform expresiei ( ), este posibilă creșterea curentului maxim admisibil, și deci a puterii de intrare, fără modificarea temperaturii convertorului, prin creșterea intensității transferului de căldură între convertor și mediu De remarcat faptul că puterea maximă de disipare a convertorului este determinată de transferul de căldură de la suprafața acestuia numai pentru convertoarele cu film foarte subțire, precum și pentru convertoarele cristaline cu o suprafață ce depășește mm Pentru convertoarele cristaline mici, chiar și electrozii subțiri elimină mai multă căldură decât este disipată de pe suprafața convertorului în sine Emf Hall maximă la o inducție a câmpului magnetic dat apare în convertor atunci când trece curentul maxim admisibil prin acesta După cum urmează din ( ) și ( ), emf Hall maximă 'ρδ Sensibilitatea la volți este raportul dintre EMF Hall maximă și inducția câmpului magnetic: γ= L), tensiunea directă aplicată diodei este distribuită între joncțiunea p-n și rezistența de bază a diodei: Upr = ir-p "I /πρ/?σ Rezistența bazei diodei crește într-un câmp magnetic transversal ca urmare a scăderii mobilității purtătorilor de sarcină majoritari și minori, ca într-un magnetorezistor convențional O creștere a rezistenței de bază a unei diode cu o bază groasă poate fi asociată și cu o scădere a duratei de viață a purtătorilor minoritari, dacă, datorită curburii traiectoriei de mișcare, purtătorii minoritari ajung la suprafața regiunii de bază, unde lor rata de recombinare este mare Ca urmare a creșterii rezistenței de bază, tensiunea directă aplicată unei diode cu o bază groasă este redistribuită: proporția de tensiune pe joncțiune pn scade Acest proces duce la o scădere bruscă a curentului care trece prin diodă, deoarece acest curent este legat exponențial de tensiunea de la joncțiunea p-n În plus, curentul care trece prin joncțiunea p-n este redus din cauza scăderii curentului de saturație, ca în cazul unei diode cu bază subțire Astfel, o diodă cu o bază groasă poate fi utilizată ca magnetodiodă cu o alegere adecvată a dimensiunilor geometrice ale bazei diodei și a parametrilor electrofizici ai materialului sursă În mod obișnuit, magnetodiodele sunt realizate cu o grosime de bază corespunzătoare mai multor lungimi de difuzie ale purtătorilor minoritari, adică o grosime de câteva mils metri Materialul semiconductor al bazei, precum și pentru magnetorezistoarele, trebuie să aibă o mobilitate mare a purtătorilor de sarcină [vezi relația ( )] Aceste cerințe sunt îndeplinite de germaniu și siliciu Ramurile drepte ale caracteristicilor curent-tensiune ale unei magnetodiode cu germaniu în câmpuri magnetice cu inducție magnetică diferită sunt prezentate în fig Pentru a evalua sensibilitatea unei magnetodiode la un câmp magnetic, prin analogie cu traductoarele Hall, se utilizează sensibilitatea la tensiune γ=Δí//(B), Orez Ramuri directe ale CVC ale unei magnetodiode cu germaniu situate în câmpuri magnetice cu inducție magnetică diferită unde AÍ este modificarea tensiunii pe magnetodioda atunci când aceasta este introdusă într-un câmp magnetic Sensibilitatea la tensiune a diodelor magnetice poate fi semnificativ mai mare decât sensibilitatea la tensiune a traductoarelor Hall din același material Magnetotranzistoare bipolare Un magnetotranzistor este un tranzistor care folosește dependența caracteristicilor și parametrilor săi de un câmp magnetic De obicei, tranzistorii bipolari sunt insensibili la magnetic câmp de filament, deoarece câmpul magnetic transversal conduce numai Orez Structura unui magnetotranzistor bipolar cu doi colectori și circuitul său de comutare la curbura traiectoriilor purtătorilor de sarcină minoritare care trec prin bază de la emițător la colector, ceea

ce echivalează cu o scădere a mobilității efective a purtătorilor minoritari în baza tranzistorului Datorită grosimii mici a bazei în tranzistoarele bipolare convenționale, aproape toți purtătorii injectați de emițător ajung la colector, în ciuda curburii traiectoriilor lor de către câmpul magnetic Un alt motiv fizic pentru modificarea parametrilor tranzistoarelor bipolare într-un câmp magnetic este o modificare a rezistenței bazei tranzistorului Pentru a crește sensibil La câmpul magnetic, magnetotranzistoarele bipolare sunt realizate cu două joncțiuni colectoare (Fig) Fără un câmp magnetic, jumătate din purtătorii de sarcină injectați cad pe un colector și jumătate pe celălalt Câmpul magnetic deviază purtătorii de la un colector la altul Prin modificarea curenților primului și celui de-al doilea colector se poate estima sau măsura inducerea magnetică a câmpului magnetic transversal, folosind, de exemplu, un fel de circuit în punte (Fig) Magnetotranzistoarele bipolare din domeniul câmpurilor magnetice slabe pot avea o sensibilitate magnetică care este cu câteva ordine de mărime mai mare decât sensibilitatea magnetică a traductoarelor Hall Întrebări de control CONCLUZIE În concluzie, remarcăm câteva perspective de dezvoltare a dispozitivelor semiconductoare, precum și probleme care trebuie rezolvate pentru dezvoltarea cu succes a electronicii semiconductoare Una dintre cele mai importante sarcini ale electronicii semiconductoare este creșterea frecvențelor de operare, creșterea vitezei dispozitivelor semiconductoare, inclusiv a circuitelor integrate S-au făcut progrese semnificative în această direcție: frecvența maximă de generare a tranzistoarelor bipolare a crescut cu câteva ordine de mărime în mai bine de treizeci de ani de la apariția primelor tranzistoare de joncțiune și a ajuns la GHz Valoarea acestui parametru al tranzistoarelor bipolare cu microunde este deja aproape de limita teoretică Să enumerăm limitările fizice fundamentale care determină limita teoretică de viteză a diferitelor dispozitive semiconductoare Prima dintre acestea este caracterul finit al timpului de relaxare a sarcinii, adică timpul de stabilire a neutralității electrice a diferitelor părți ale structurii unui dispozitiv semiconductor Timpul de relaxare τ=εεορ ar trebui să fie mult mai mic decât semiciclul semnalului alternativ Acest lucru este necesar pentru ca în timpul modificării tensiunii de intrare pe tranzistorul bipolar, înălțimea barierei de potențial a joncțiunii emițătorului să aibă timp să se schimbe, în tranzistorul cu efect de câmp - modificarea grosimii canalului are timp să apară, in varicap - s-ar modifica grosimea jonctiunii pn, in generatorul Gunn - ar forma domeniu etc Pe de altă parte, concentrația maximă de impurități în baza diodelor, tranzistoarelor bipolare sau în substratul tranzistorilor cu efect de câmp este de obicei limitată de sus de valori de IO IO cm- Timpul de relaxare a sarcinii pentru astfel de concentrații de impurități din siliciu se dovedește a fi ~ x ~ s A doua limitare fundamentală a vitezei dispozitivelor semiconductoare este caracterul finit al vitezelor purtătorilor de sarcină și, în consecință, un anumit timp necesar pentru extragerea energiei dintr-o constantă electrică câmpurile purtătorului de taxă Timpul minim pentru o modificare a energiei electronilor cu kT tkT= kT/ÇqEmaxvma\ ), unde £max este intensitatea maximă admisă a câmpului electric peste care are loc defectarea; iar max este viteza maximă de deplasare a electronilor Pentru siliciu la Γ= K, se obține tmax= - V/cm, vmax= IO cm/s, tkT= , · IO- s În majoritatea dispozitivelor semiconductoare, procesul de amplificare - preluarea energiei dintr-un câmp electric constant și

transferul unei părți a energiei într-un câmp electric alternativ - are loc într-o joncțiune p-n, unde intensitatea câmpului electric variază în funcție de coordonată Prin urmare, pentru o parte a traseului, purtătorul de sarcină este afectat de intensitatea câmpului electric, care este mult mai mică decât εmax Același lucru se poate spune despre viteza purtătorilor de taxe Astfel, timpul real necesar purtătorului de sarcină pentru a dobândi o energie suplimentară de câțiva kT ar trebui să fie mai mare de IO- s Pe lângă aceste două motive fizice fundamentale pentru limitarea vitezei în diferite dispozitive semiconductoare, este necesar să se țină cont de constantele de timp pentru reîncărcarea capacităților de barieră ale joncțiunilor pn (în tranzistoarele bipolare, tiristoare, diode, tranzistoare cu efect de câmp cu o joncțiune de control), constantele de timp pentru reîncărcarea capacităților distribuite în structurile MOS MIS, tranzistoarele și dispozitivele cuplate la sarcină Astfel, pentru a crește gama de frecvență, odată cu îmbunătățirea diferitelor dispozitive cu microunde semiconductoare (oscilatoare Ganne, diode de tranzit avalanșă, tranzistoare bipolare și cu efect de câmp), este necesar să se găsească noi principii pentru amplificarea și generarea oscilațiilor electrice O creștere a vitezei diodelor redresoare (în special a celor puternice, ceea ce este foarte important) poate fi obținută prin utilizarea heterojoncțiilor și redresarea joncțiunilor electrice dintre metal și semiconductor, adică structuri fără injectarea purtătorilor de sarcină minori în baza diodei În acest caz, este posibil să se excludă procesul relativ lent de acumulare a purtătorilor minori și, în consecință, procesul de resorbție a acestor purtători O altă problemă este de a crește puterea de disipare admisă a dispozitivelor semiconductoare, care este dificil de implementat fără a compromite viteza acestor dispozitive Problema eliminării căldurii este tipică nu numai pentru diodele redresoare de mare putere, tranzistoarele, generatoarele Gunn, laserele semiconductoare și alte dispozitive semiconductoare discrete, ci și pentru circuitele integrate O soluție la această problemă poate fi utilizarea materialelor semiconductoare cu un bandgap mare (mai mare decât cel al siliciului) Conductivitate proprie semiconductori cu spatiu larg devine esential la temperaturi mai ridicate Prin urmare, dispozitivele bazate pe acestea pot funcționa la putere specifică de disipare mare Un astfel de material este arseniura de galiu Concomitent cu avantajul remarcat al arseniurii de galiu, ar trebui să se țină cont și de mobilitatea și mai mare a purtătorilor de sarcină din aceasta, care ar trebui să asigure o creștere a vitezei dispozitivelor semiconductoare pe bază de arseniură de galiu, atât în versiunea discretă, cât și în cea integrată Cu toate acestea, pentru a dezvolta circuite integrate bazate pe arseniură de galiu, este necesar să se depășească o serie de dificultăți tehnologice: în special, să învețe cum să crească straturi dielectrice pe monocristale de arseniură de galiu fără a crea o densitate mare a stărilor de suprafață De aceea, nu a fost încă posibilă fabricarea tranzistoarelor MOS de înaltă calitate pe bază de arseniură de galiu Cele mai importante sarcini care există întotdeauna în electronica semiconductoare sunt creșterea fiabilității și reducerea costurilor dispozitivelor semiconductoare discrete și integrate Rezolvarea acestor probleme necesită, de asemenea, un studiu cuprinzător al proceselor fizice care au loc în dispozitivele semiconductoare, îmbunătățirea tehnologiilor existente pentru producerea acestora, dezvoltarea de noi metode tehnologice, precum și căutarea unor noi principii de funcționare și efecte care pot fi utilizate pentru efectuează

transformările funcționale necesare LISTA LITERATURII RECOMANDATE
Stepanenko I P Fundamentele teoriei tranzistoarelor și a circuitelor tranzistoare - M : Energie, Batushev V A Dispozitive electronice - M : Liceu, Vikulin I M , Stafeev V I Fizica dispozitivelor semiconductoare -M : Radio sovietică, și C Fizica dispozitivelor semiconductoare: Per din engleza - M : Mir, Morozova I G Fizika elektronnykh upravleniya [Fizika elektronnykh instrumentov] - M : Atomizdat, Stepanenko I P Fundamentele microelectronicii - M : Radio sovietică, T M Aga Xan, Circuite integrate - M : Energoatomiz-dat, Terekhov V A Caiet de sarcini pentru dispozitive electronice -* M : Energo-atomizdat, GOST - "Materiale semiconductoare Termeni și definiții ale principalilor parametri electrofizici GOST - (ST SEV -) "Dispozitive semiconductoare Termeni și definiții" GOST - (ST SEV -) "Sistem unificat pentru documentația de proiectare Denumirile grafice condiționate în scheme Dispozitive semiconductoare GOST - (ST SEV -) "Dispozitive semiconductoare Dimensiuni principale GOST - "Poli și blocuri redresoare semiconductoare Dimensiuni principale GOST - (ST SEV - , ST SEV -) "Diode semiconductoare Termeni, definiții și denumiri de litere ale parametrilor GOST - (ST SEV -) "Tranzistoare bipolare Termeni, definiții și denumiri de litere ale parametrilor GOST - (ST SEV -) Tiristoare Termeni, definiții și denumiri de litere ale parametrilor GOST - (ST SEV -) Tranzistoare cu efect de câmp Parametrii electrici Termeni, definiții și denumiri de litere" GOST - (ST SEV -) "Microcircuite integrate Termeni și definiții" GOST - (ST SEV -) "Emițători semiconductori Termeni, definiții și denumiri de litere ale parametrilor GOST - "Dispozitive semiconductoare pentru prezentarea vizuală a informațiilor Dimensiuni principale GOST - "Receptoare de radiații fotoelectrice semiconductoare și dispozitive fotodetectoare Termeni și definiții" GOST - (ST SEV -) Optocuple Termeni, definiții și denumiri de litere ale parametrilor GOST - (ST SEV -) "Microcircuite optoelectronice integrate Termeni, definiții și denumiri de litere ale parametrilor GOST - Dispozitive semiconductoare termoelectrice Termeni și definiții" DENUMIREA VALORILOR DE BAZĂ ACCEPTATE ÎN CARTE B - inducție magnetică, coeficient de sensibilitate la temperatură, luminozitate C - capacitate D este coeficientul de difuzie E - intensitatea câmpului electric, iluminare £ - EMF F - cifra de zgomot f - frecventa g este densitatea de sarcină spațială h este constanta lui Planck (h = h/ ji) I - constantă, valoarea curentului efectiv, intensitatea luminii i - valoarea curentului instantaneu J este densitatea curentului k - constanta Boltzmann, numărul de undă L este lungimea de difuzie a purtătorilor de sarcină, inductanța / - lungimea, distanța, drumul liber al purtătorului de încărcare Λ este factorul de multiplicare a avalanșei m - masă, sensibilitate la deformare m* este masa efectivă a purtătorului de sarcină N este concentrația de impurități, densitatea efectivă a nivelurilor de energie n este concentrația de electroni po este concentrația de echilibru a electronilor P - constantă, valoarea efectivă a puterii, impuls p este concentrația găurilor ro este concentrația de echilibru a găurilor Q - încărcare, factor de calitate, cantitate de căldură q este sarcina elementară Φ - flux luminos R - rezistență statică, rază d - rezistență diferențială, rază S - zona, abruptul caracteristicii s este viteza recombinării suprafeței T - temperatura absolută, perioada de oscilație TK/ - coeficientul de temperatură curent TK/? - coeficientul de rezistenta la temperatura TKÍ - coeficient de temperatură de tensiune t - temperatura, timp U - valoare constantă, efectivă a tensiunii și - valoarea instantanee a tensiunii V - volum și - viteza W

- grosimea bazei E - energie α este coeficientul de transfer al curentului emițătorului modelului teoretic unidimensional al tranzistorului, coeficientul de ionizare de impact, coeficientul termo-EMF, indicele de absorbție a* este randamentul colectorului ap este coeficientul de transfer β este coeficientul de transfer de curent al bazei modelului teoretic unidimensional al tranzistorului, coeficientul de neliniaritate γ - conductivitate specifică, randamentul emițătorului δ este grosimea joncțiunii p-p e este permisivitatea relativă în - constantă electrică η - factor de eficiență κ - conductivitate termică λ este lungimea de undă μ - mobilitate μπ - raportul lui Poisson V este frecvența în domeniul optic P - coeficientul Peltier ρ - rezistivitate σ - conductivitate τ este durata de viață a purtătorilor de sarcină, constantă de timp φ - potenţial, unghi, defazare X - Coeficientul Hall ω - frecvența unghiulară Următoarele denumiri sunt utilizate în figuri: - zona libera (banda de conducere) - banda de valență - electroni - gauri - ioni (sarcini fixe) - flux de fotoni (radiație optică, absorbție, interacțiune) - generator de tensiune - generator de curent SIMBOLULE GRAFICE CONDIȚIONATE ALE DISPOZITIVELOR PRINCIPALE SEMICONDUCTORE ÎN SCHEME Dioda Dioda Schottky Dioda Zener (dioda redresoare de avalansa) Dioda Zener cu doi anozi dioda tunel diodă inversată Varicap Tranzistor bipolar tip p~n~r tranzistor bipolar de tip npn, tranzistor unijuncție η-bază Diodă tiristor Tiristor cu diodă conductoare inversă Diodă tiristor simetric Tiristor triodă controlat prin anod Tiristor triodă cu control catod Triodă tiristor simetric FET cu joncțiune de control și canal p Casa FET și canalul p cu tranziție de control FET de poartă izolată îmbogățit (canal p și canal p indus) Tip de epuizare IGFET (cu canal p și canal p încorporat) dioda emitatoare fotorezistor Fotodiodă Fototranzistor tip p-n-p fototiristor Fotocelula solar fotovoltaic Dimensiunile (în milimetri) ale denumirilor grafice convenționale ale dispozitivelor semiconductoare în conformitate cu GOST - (ST SEV -) pot avea următoarele valori: Un aBbcDdR CONSTANTE FIZICE UNIVERSALE constanta lui Planck /gæ , IO- J "s \u d , IO- eV-s constanta Boltzmann kx , IO" J/K = , IO- eV/K Masa în repaus a unui electron m ^ , - ~ kg \u d , IO " g Sarcină electronică (sarcină elementară) IO " C Constanta electrica ε " , " F/m = , IO- F/cm Constanta magnetica μ ~ , - H/m = , " H/cm Viteza luminii în vid cæ IO m/s = IO cm/s INDEX SUBIECTULUI Indexul subiectelor include termenii și conceptele principale găsite în manual Alături de termen sunt enumerate doar acele pagini în care puteți găsi o definiție sau interpretare a acestui termen, precum și informații care explică semnificația acestuia Termenii formați dintr-un adjectiv și un substantiv sunt plasați în indexul subiectului în cele mai multe cazuri cu inversare, adică substantivul este luat ca cuvânt principal Cu toate acestea, unii termeni folosiți în literatura tehnică, de obicei fără inversare (de exemplu, "tranziție electron-gaură"), sunt enumerați de două ori în indexul alfabetic

semiconductor redresor - - dioda - - pilonul Semiconductor degenerat Nivel ridicat de injecție în baza diodei - - - în baza tranzistorului Înălțimea barierei de potențial pn joncțiunea Generatorul Gann - quantum optic - cu acumulare limitată de încărcare spațială - termoelectric Curent de generație Generarea purtătorului de taxă - - - lumina - - - termică Heterojoncția Circuit integrat hibrid Tranzistor orizontal Frecvența de tăiere a coeficientului de transfer de curent al bazei tranzistorului Dioda Zener cu anod dublu Nivelul energetic de demarcație Diak Redresor cu diodă - Ganna - detector - impulsul - emisie infraroșu - zbor de avalanșă - avalanșă - convertit - comutare - plan - semiconductor - cuptor cu microunde , - emiterea de lumină - cu o recuperare bruscă a rezistenței inverse - amestecare - cu o bază groasă - cu baza subtire - punctat - tunelul - frecventa - Schottky - zgomot Dinistor Disc Corbino Lungimea difuziei Capacitatea de difuzie a bazei tranzistorului , - - dioda , , - - colector de tranzistori , - - emițător tranzistor , Rezistența la difuzie de bază tranzistorul , - câmp electric Condensator de difuzie - tranziție p-n - rezistenta Difuzia purtătorilor de sarcină Lungimea difuziei - calea liberă a purtătorului de încărcare Partea de jos a zonei energetice permise Ί Donator Deriva transportatorului Tranzistor de deriva Zgomot de lovitură Tranziție de la gaură la gaură Legea acțiunii în masă Zona interzisa Poarta FET Zona de valență - interzis - impuritate - conductivitate - permis - gratuit - energie Excesul de concentrare a purtătorilor de sarcină Zgomot excesiv Recombinarea radiativă Emițător semiconductor - folie electroluminiscentă - - pulbere Implantarea ionică Dioda de impuls Inversarea populației a nivelurilor de energie Pornire inversă a tranzistorului Stratul invers Indicator de semn semiconductor Injectarea de purtători de taxe minore Circuit integrat - - analog - - hibrid - - logic - - optoelectronică - - semiconductor - - digital Dioda emițătoare de infraroșu Ionizarea la impact Implantarea ionică Inserție ionică Sursa FET Canal în FET - conductivitate electrică de suprafață Accident , Catodoluminiscența Nivel cvasi-Fermi pentru electroni (găuri) Eficiența cuantică a generării de purtători Colectionar Tranziția colectorului FET-uri complementare Componenta circuitului integrat Conversie pn joncțiunea Condensator de difuzie - TIR - filmul Contact metal-semiconductor - metalurgică - semiconductori cu un singur tip de conductivitate electrică Diferența de potențial de contact Concentrația purtătorului de sarcină este excesivă - - - dezechilibru - - - echilibru - - - proprii Dispozitiv de conversie corpusculară Rata de rectificare - difuzie - reproducerea avalanșelor - neliniarități , - Peltier - transmiterea curentului de bază al unui model teoretic unidimensional al tranzistorului - - - emițător al modelului teoretic unidimensional al tranzistorului - transferul - termo-EMF - ionizare prin impact - amplificarea fotorezistorului - Sala - zgomot , - normalizat Panta FET , Dioda avalanșă Diodă avalanșă - defalcarea joncțiunii pn ,, Laser semiconductor Recombinare liniară Capcană de captare - recombinare , Luminescență Magnetodioda Efect magnetorezistiv , Magnetorezistor Magnetotranzistorul Frecvența maximă de generare a tranzistorului Masa purtătorului de sarcină efectiv , Condensator MIS Structura MIS Tranzistor MOS - - cu canal indus , , - - cu canal încorporat , Stare lentă de suprafață Recombinare interbandă Structură Mesa Contact metalurgic Microcircuit integrat - - analog - - hibrid - - logic - - optoelectronică - semiconductor - - digital Microelectronica Modelul tranzistorului teoretic unidimensional Modularea rezistenței bazei diodei , , MOSFET Setul de diode Tensiune inversă - drept Extensie epitaxiala Curentul inițial al colectorului -

emițător Semiconductor nedegenerat Recombinarea directă Transfer indirect de electroni Concentrația de neechilibru a purtătorilor de sarcină Joncțiunea p-n asimetrică Injecție scăzută Pornirea normală a tranzistorului Zgomot normalizat figura Stratul epuizat Stratul îmbogățit Direcția inversă pentru joncțiunea p-p-da Tensiune inversă Curentul invers al colectorului - - emițător Dioda inversată Modelul teoretic unidimensional al tranzistorului Tranzistor unijunction Tranziție ohmică , , Generator cuantic optic Optocupler Circuit integrat optoelectronic Dispozitiv semiconductor optoelectronic Refuz brusc - catastrofal , - treptat - condițional , Baza pasivă a tranzistorului Comutator semiconductor amorf Dioda de comutare Tranziție ohmică , , - gaura-gaura - Schottky - electroni direcți - - indirect - electric - gaura de electroni - - - difuzie - - - colector - - - conversie - - - asimetric - - - neted - - - plană - - - ascuțit - - - simetric - - - plutitor - - - emițător - - - epitaxială - electronic-electronic Partea periferică a bazei tranzistorului CCD (dispozitiv cuplat cu încărcare) Placă de contact Densitatea ambalajului Recombinarea suprafeței , Starea suprafeței rapidă - - lent Tranzistor de încărcare de suprafață Defalcarea suprafeței joncțiunii PN Absorbția fotonului - - suporturi de încărcare - - impuritate - - proprii Mobilitatea purtătorilor de taxe Pozistor Rata de absorbție FET - - cu obturator izolat - - cu tranziție de control -Câmp de difuzie electrică Semiconductor degenerat - nedegenerat - impuritate - compensat - propriu - tip p - tip p Circuit integrat semiconductor - termopil - scara Dispozitiv termoelectric semiconductor Bolometru cu semiconductor - dispozitiv galvano-magnetic - dioda - semn indicator - emitator - element radiant - laser - dispozitiv de afișare a informațiilor - dispozitiv cuplat la încărcare - receptor de radiații - receptor de radiații penetrante - dioda emițătoare de lumină - dioda zener - pompa de caldura , - bloc termoelectric - fotodioda - fotocelula - frigider , - ecran, Eșecul treptat Plafonul zonei permise Frecvența limită a raportului de transfer al curentului de bază - - - transmisie curent emițător Traductor Hall Dispozitiv de afișare a informațiilor semiconductoare - optoelectronic semiconductor - cuplat la sarcină Receptor de radiații semiconductoare Zona de impurități Semiconductor impur Tensiunea de defectare a diodei Dioda de avarie - - avalanșă - - suprafața - - pentru defecte - - termică - - tunelul - tranzistorul - - secundar Conductivitate Direcția înainte pentru joncțiunea p-n - tensiune Transferul direct de electroni Funcția de lucru a electronilor Concentrația de echilibru a electronilor (găuri) Contact diferență de potențial Purtători de încărcare "Încălzire" Zona de energie permisă Mod de funcționare a tranzistorului activ , , - saturație , , - - - limitele , , Rezistorul de difuzie - filmul Tranziție p-n ascuțită Curentul de recombinare Recombinare neradiativă - forțat - radiant - liniar - interzona - imediat - suprafata , - spontan - spontan - stimulat - cu participarea capcanelor de recombinare , Dioda semiconductoare cu microunde , Generarea ușoară de purtători de sarcină Diodă emițătoare de lumină (LED) Zona liberă (energie) dioda cu microunde tiristor simetric Semiconductor compensat Rata de recombinare a suprafeței - recombinare la tranziția ohmică Stratul epuizat - îmbogățit - invers Dioda semiconductoare de amestecare Închiderea joncțiunii tranzistorului Concentrația intrinsecă a purtătorilor de sarcină Semiconductor nativ Raportul Einstein Difuziunea rezistenței bazei tranzistorului , - - - volumetrice , - colector , - saturația tranzistorului - tranziție ohmică - specific tranziției ohmice - răspândirea - specific stratului - emițător , Joncțiunea termocuplului

Tranziție p-n din aliaj Dioda Zener - cu doi anozi - termocompensat Stabistor Coeficientul de transfer de curent static al bazei tranzistorului - - - curent emițător tranzistor Gradul de integrare Dren FET Stalp redresor semiconductor Generarea termică a purtătorilor de sarcină Defalcare termică a diodei Zgomot termic Termistor - incalzire indirecta - incalzire directa Termopilul semiconductor Dioda Zener compensată termic Termistor Forța termoelectromotoare (termo-EMF) Generator termoelectric Termocuplu tiristor - dioda - conductiv în sens invers - cu joncțiune emițător șuntat - simetric - trioda Curent de generație - inițial colector - saturație - recombinare - emițător inițial Dioda punct Tranzistor bipolar - - fără derivă - - partea - - orizontală - - cu dioda Schottky - - deriva - - integrală - - mesaplanar -multi-colector - - planar - - plutitor - - epitaxial-planar - joncțiune simplă - câmpul - - sarcină de suprafață - - cu obturator izolat - - cu canalul indus , - - cu canalul încorporat , - - cu tranziție de control Triac Trinistor Tunnelarea purtătorilor de taxe Dioda tunel - defectarea joncțiunii p-n Hol Colț Ionizarea la impact Conductivitatea semiconductorului Rezistivitatea joncțiunii ohmice - - stratul Ecuația de continuitate - Poisson - curenți Nivel de injecție ridicat - - scăzut - - mediu Nivelul de demarcație energetică - - capcane de captura - - - capcană de recombinare , - - suprafața - - Fermi Condiție de avarie avalanșă joncțiunea pn Condiția de neutralitate electrică a joncțiunii pn Refuzul condiționat , Circuitul echivalent fizic al tranzistorului , Circuitul echivalent formal al tranzistorului Fotodioda Fotoluminiscență Efect fotorezistiv Fotorezistor Fototiristor Fototranzistor Fotocelula Frigider cu semiconductor , Dioda de frecventa O parte a bazei tranzistorului activ - - - pasiv - - - periferic Intervalul de bandă Scara semiconductoare Raport de zgomot Dioda de zgomot Zgomot termic - puști - redundant EMF decembrie Ecran semiconductor Extragerea purtătorilor de taxe Tranziție electrică Emițător de film electroluminiscent - emițător de pulbere Electroluminiscența Tranziția electron-gaură Tranziția electronic-electronic Electroelement atomic Element radiant semiconductor - circuit integrat - memorie pe semiconductor amorf Emițător Emițător pn joncțiune Zona energetică Capcană de energie Nivelul - - capcană de recombinare Energie de ionizare donator (acceptor) - afinitate electronică Extensie epitaxiala Joncțiunea pn epitaxială Efectul Gann - Gauss - Seebeck - magnetorezistiv , - Peltier - prelungiri ale bazei tranzistorului - fotorezistiv - Sala Masa efectivă a purtătorului de sarcină , Cuantumul eficienței generației - colector - emițător CUPRINS pagină

câmpului electric și a potențialului în tranziția electron-gaură § Calculul analitic al unei tranziții ascuțite electron-gaură § Calcul analitic al unei tranziții netede electron-gaură cu o distribuție liniară a concentrației de impurități § Capacitatea de barieră a joncțiunii electron-gaură § Tranziție ohmică la contactul semiconductorilor cu un tip de conductivitate electrică § Redresare și joncțiuni ohmice la contactul metal-semiconductor § Heterojoncţii § Proprietăţi şi parametri ohmic tranziţii Capitolul § Structura și elementele de bază ale § Caracteristica curent-tensiune a diodei în timpul injectării și extragerii purtătorilor de sarcină § Calculul distribuției purtătorilor de sarcină minori în baza diodei § Calculul curenților continui care trec prin diodă și asociați cu injectarea și extragerea purtătorilor de sarcină § Cazuri particulare de calcul a distribuției purtătorilor de sarcină minori și a curentului de saturație § Calculul curenților alternativi și total conductanța diodei § Grafice ale dependențelor de frecvență Parametrii diodei § Semnificația fizică a parametrilor diodei § Limitele de aplicabilitate a privatului cazuri de calculare a parametrilor diodei § Generarea și recombinarea purtătorului Celulele de încărcare într-o tranziție electron-gaură § Defectarea avalanșelor § Defectarea tunelului § Fugire termică § Influența stărilor de suprafață asupra caracteristicii curent-tensiune a diodei § Procese în diode în general curenți continui § Calculul caracteristicii curent-tensiune Ticurile diodei la curenți înalți înainte § Caracteristici volt-amper diodă în coordonate semilogaritmice § Procese tranzitorii în diode § Diode de joasă frecvență planare redresoare § Redresoare cu seleniu § Diode cu impulsuri § Diode Schottky § Diode cu o recuperare bruscă a rezistenței inverse § Diode cu microunde § Diode Zener § Stabistori § Diode de zgomot § Diode de avalanșă § Diode tunel § Diode inversate § Varicaps § Fiabilitatea diodelor Capitolul § Structura și principalele moduri de roboți § Distribuția fluxurilor staționare kov de purtători de sarcină § Distribuția purtătorilor de taxe § Curenți continui cu reactivă presa de banc § Fenomene în tranzistoare cu durere curenți mari § Parametri statici § Defalcarea tranzistoarelor § Caracteristici statice § Funcționarea tranzistorului pe un semnal variabil mic § Parametrii cu semnal mic § Circuite echivalente § Circuit echivalent de unidimensional model teoretic § Capacitate de barieră ale joncțiunilor și rezistența de bază § Caracteristicile frecvenței § Funcționarea tranzistorului pe impulsuri § Zgomot în tranzistoare § Tehnologia de fabricație și proiectarea tranzistoarelor bipolare § Tranzistoare unijunction § Fiabilitatea tranzistoarelor Capitolul § Diode tiristoare § Diodă tiristor cu derivație joncțiunea emițătorului § Tiristoare triode § Tiristoare inverse conductoare § Tiristoare simetrice § Modalități de control al tiristoarelor § Tehnologia de proiectare și fabricație tiristoare Capitolul § Tranzistoare cu efect de câmp cu o joncțiune de control § Calculul caracteristicilor statice de ieșire ale unui tranzistor cu efect de câmp cu tranziție de control § Circuite echivalente de câmp Tranzistor cu joncțiune de comandă § Proprietățile de frecvență ale tranzistoarelor cu efect de câmp cu o tranziție de control § Tranzistoare cu efect de câmp cu poartă izolată § Calculul static de ieșire caracteristica tranzistorului cu efect de câmp cu inchidere izolata § Parametrii și proprietățile câmpului Tranzistoare cu poartă izolată § Dispozitive semiconductoare cu comunicare obișnuită § Varietăți de dispozitive cu încărcare comunicare urlată Capitol? § Sarcini și principii de microelectronică Nicky § Clasificarea integrală a mi- kroschem zzz § Metode de izolare a elementelor microcircuite §

Elemente active § Elemente pasive Capitolul § Principiul de funcționare a generatoarelor Hanna § Tehnologia de fabricare a generatoarelor şanţul Hann § Parametrii și proprietățile generatoarelor Hanna § Generatoare cu acumulatori limitate încărcare spațială Capitolul § Clasificarea optoelectronică dispozitive semiconductoare § Afișează dispozitivele semiconductoare transmisie de informații și diode emițătoare de infraroșu § pulbere electroluminiscentă- Emițători § Film electroluminiscent emiţători § Lasere § Fotorezistente § Fotodiode § Fotocelule semiconductoare § Fototranzistoare și fototiristoare § Receptoare de radiații penetrante şi aparate de conversie corpuscular § Optocuple și dispozitive optoelectronice chips-uri Capitolul § YL Termistori de încălzire directă § Bolometre § Termistori de încălzire indirectă § Termistori Capitol!! § Principiul de funcționare a varistoarelor din carbură de siliciu § Caracteristici § Varistoare semiconductoare de oxid Capitolul § Comutatoare bazate pe semiconductori amorfi § Elemente de memorie bazate pe semiconductori amorfi § Fiabilitatea, stabilitatea și durata de viață a dispozitivelor bazate pe semiconductori amorfi Capitolul § Design și funcționare § M Generatoare termoelectrice § Frigidere și pompe de căldură Capitolul § Cum funcționează § Transformatoare de sală § Magnetorezistoare § Magnetodiode şi magnetotranzistoare Concluzie Lista literaturii recomandate Denumirile principalelor cantități adoptate în carte Simboluri grafice convenționale ale principalelor dispozitive semiconductoare din circuite Constante fizice universale Index EDIȚIE EDUCAȚIONALĂ Pașinkov Vladimir Vasilievici, Chirkin Lev Konstantinovici DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE Cap editat de V I Trefilov Editor I G Volkova Redactori juniori I A Isaeva, I A Titova Copertă cartonată de artistul VV Garbuzov Editor de artă T M Skvortsova Editor tehnic N V Yashukova Corector G I Kostrikova IB nr Ed Nr ER- Predată în platou Semnat pentru a apăsa / / T- Format X / Bum carte-jurnal Căști marca temporală Imprimare de birou Volumul conv p l + , arb p l forz , arb kr -ott , ed l + , ed l forz Tiraj de exemplare Zach Nr Pret r k Editura Școlii Superioare, , Moscova, GSP- , str Neglinnaya, / Combinația poligrafului Yaroslavl a Soyuzpolygraphprom sub Comitetul de stat al URSS pentru edituri, tipărituri și comerț cu cărți , Iaroslavl, st Libertate, grkon -~T În Pp: :nno - = , În IO IO \u d , V ( ) De ce este diferența de potențial existente in nonynpoBo~~tR cu o distribuție neuniformă a impurităților, nu se poate măsura cu un voltmetru? Ng-Na Eff e · X E , kT grad Ng , E= -Vt ΠNg V V Pasynkov L K Chirkin DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE Ediția a patra, revizuită si completat Aprobat de Minister învățământul superior și secundar de specialitate al URSS ca manual pentru studenții universitari, studenți la specialitățile "Semiconductori și dielectrici" și "Dispozitive semiconductoare și microelectronice" Moscova "Liceu" BEC p UDC Referent Departamentul "Dispozitive semiconductoare" al Institutului de Inginerie Radio, Electronică și Automatizare din Moscova (Șeful Departamentului Profesor asociat N V Korotkova) Pasynkov V V , Chirkni L K P Dispozitive semiconductoare: manual, pentru universități pe special "Semiconductoare și dielectrice" și "Dispozitive semiconductoare și microelectronice" - ed a IV-a, revizuită si suplimentare -M : Şcoala superioară, - p bolnav Cartea tratează procesele fizice din dispozitivele semiconductoare și elementele circuitelor integrate, principalele proprietăți, caracteristici și parametri ai acestora, proiectarea și caracteristicile tehnologice ale dispozitivelor semiconductoare în proiectarea integrată și principiile generale ale microelectronicii Ediția a -a (a -a -) are materiale

revizuite legate de diode, tiristoare și alte dispozitive - η - BEK ( )- FO (c) Editura Școlii Superioare, (c) Editura Școlii Superioare, , cu modificările ulterioare PREFAȚĂ Un inginer de inginerie electronică la specialitățile "Semiconductori și dielectrici" și "Dispozitive semiconductoare și microelectronice" trebuie să fie specialist în proiectarea, construcția, tehnologia și aplicarea dispozitivelor și dispozitivelor bazate pe diverse procese fizice într-un corp solid Fără cunoașterea principiului de funcționare și a proprietăților unui anumit dispozitiv semiconductor, este imposibil să efectuați corect un calcul, să dezvoltați o tehnologie de producție și să organizați producția, să investigați proprietățile și să măsurați parametrii acestui dispozitiv și să utilizați rațional acest dispozitiv într-unul sau alt circuit, într-una sau alta instalație diferită în condiții diferite de funcționare În consecință, fără o asimilare solidă a fizicii dispozitivelor semiconductoare și a elementelor circuitelor integrate, este imposibil de înțeles și asimilat chiar și prevederile de bază ale aproape tuturor disciplinelor speciale pe care elevii le vor studia în conformitate cu programele de învățământ după disciplinele "Dispozitive semiconductoare și microelectronică", "Dispozitive electronice și microelectronice", "Fizica dispozitivelor semiconductoare", "Dispozitive electronice și semiconductoare", etc Cartea poate fi folosită nu numai ca manual pentru specialitățile remarcate, ci și ca suport didactic pentru studenții altor specialități în inginerie electronică Prin urmare, în cap al cărții prezintă informațiile de bază despre fizica semiconductoarelor în cantitatea minimă necesară înțelegerii principiului de funcționare și proprietăților diferitelor dispozitive semiconductoare și elemente ale circuitelor integrate Înainte de a studia dispozitivele semiconductoare, ar trebui să vă familiarizați cu notarea mărimilor fizice adoptate în carte Principiul de funcționare al majorității dispozitivelor semiconductoare se bazează pe utilizarea diferitelor proprietăți de redresare a joncțiunilor electrice Prin urmare, pentru o înțelegere profundă a proprietăților și caracteristicilor diferitelor dispozitive semiconductoare, este necesar să stăpâniți materialul Ch , dedicat fenomenelor de contact, iar cap , unde sunt luate în considerare diodele semiconductoare, a căror structură este mai simplă decât structurile majorității celorlalte dispozitive Când se iau în considerare tipuri specifice de semiconductori Pentru dispozitivele de ieșire, trebuie acordată atenție relației dintre proprietățile și caracteristicile lor cu modelele generale studiate anterior Cartea a fost compilată pe baza experienței de prelegere a autorilor și a colegilor lor de la Departamentul de Dielectrici și Semiconductori al Ordinului Leningrad din Lenin și Ordinul Institutului Electrotehnic Revoluția din Octombrie V I Ulyanov (Lenin) Autorii au fost foarte ajutați de comentariile recenzenților primelor trei ediții ale manualului, laureat al Premiului Lenin prof Ya A Fedotova, prof K V Shalimova, membru corespondent Academia de Științe a BSSR V A Labunov și angajații acestora La pregătirea manualului au contribuit și profesori de la multe universități din URSS, care, deși și-au îmbunătățit abilitățile la Departamentul de Dielectrice și Semiconductori din LETI, au luat parte la discuția asupra diferitelor probleme ale fizicii dispozitivelor semiconductoare și a metodelor de prezentarea lor Ne exprimăm recunoștința profundă profesorilor Departamentului de Dispozitive Semiconductoare a Institutului de Inginerie Radio, Electronică și Automatizare din Moscova, condus de Conf univ N V Korotkova, pentru comentariile valoroase făcute în timpul revizuirii manuscrisului ediției a patra a manualului Autorii

INTRODUCERE Direcțiile principale pentru dezvoltarea economică și socială a URSS pentru anii - și pentru perioada până în anul au stabilit sarcina de a asigura creșterea progresivă a economiei, creșterea constantă a eficienței producției pe baza intensificării sale cuprinzătoare , și asigurând o accelerare în continuare a progresului științific și tehnologic Progresul științific și tehnologic este de neconceput fără electronică Dezvoltarea intensivă a electronicii este asociată cu apariția unor noi și diverse dispozitive semiconductoare și microcircuite integrate, care sunt utilizate pe scară largă în tehnologia computerelor, automatizări, inginerie radio și televiziune, în echipamente de măsurare, medicină, biologie etc d În primele instalații electronice au fost folosite dispozitive semiconductoare sub formă de diode punctiforme sau, așa cum se numeau înainte, detectoare cu cristale Proprietățile de rectificare ale contactelor dintre metale și unii compuși ai sulfului au fost descoperite în În , când A S Popov a inventat radioul, a folosit un coerer de pulbere, în care au fost utilizate proprietățile neliniare ale sistemelor granulare În , O V Losev a folosit rezistența diferențială negativă, care apare în anumite condiții la contactele punctuale ale unui metal cu un semiconductor, pentru a genera și a amplifica oscilații electromagnetice de înaltă frecvență În plus, el a descoperit strălucirea cristalelor de carbură de siliciu atunci când un curent trece printr-un punct de contact Cu toate acestea, în această perioadă, tehnica dispozitivelor electro-vacuum s-a dezvoltat cu succes și, din cauza cunoașterii insuficiente a structurii semiconductoarelor și a proceselor electrofizice care au loc în ele, dispozitivele semiconductoare nu au primit o dezvoltare și aplicare semnificativă la acel moment În timpul Marelui Război Patriotic, au fost dezvoltate diode de germaniu și siliciu de înaltă frecvență și superînaltă frecvență În , URSS a început producția de generatoare termoelectrice semiconductoare pentru conversia directă a energiei termice în energie electrică Generatoarele termice erau folosite pentru alimentarea stațiilor radio portabile ale detașamentelor partizane Crearea și producerea acestor dispozitive și a multor alte dispozitive a devenit posibilă datorită studiilor teoretice și experimentale fundamentale ale proprietăților semiconductorilor, efectuate de un grup de oameni de știință condus de academicianul A F Ioffe Din , adică de la crearea unui tranzistor punctual de către oamenii de știință americani J Bardeen, W Brattain și W Shockley, a început o nouă etapă în dezvoltarea electronicii semiconductoare În anii au fost dezvoltate diverse tipuri de tranzistoare bipolare, tiristoare, diode redresoare puternice cu germaniu și siliciu, fotodiode, fototranzistoare, fotocelule din siliciu, diode tunel etc Principiul de funcționare al tranzistoarelor cu efect de câmp cu poartă izolată a fost propus încă din anii ai secolului nostru, dar înainte de dezvoltarea finală a acestor tranzistoare, mulți ani de cercetare în procesele electrofizice la interfața unui semiconductor cu un dielectric și era necesară tehnologia structurilor necesare În anii ai secolului nostru începe producția de circuite integrate În același timp, a fost posibilă reducerea semnificativă a costurilor și creșterea fiabilității dispozitivelor electronice semiconductoare, reducerea semnificativă a greutății și dimensiunilor lor totale prin formarea tuturor elementelor pasive și active ale circuitelor integrate într-un singur proces tehnologic, precum și a unui rezultat al integrării constructive Etapa actuală de dezvoltare a electronicii semiconductoare în țara noastră se caracterizează printr-o cantitate mare de cercetare și muncă tehnologică care vizează îmbunătățirea în continuare a

dispozitivelor semiconductoare existente și crearea de noi circuite integrate capitol Informații de bază despre fizica semiconductorilor § BANZI DE ENERGIE ALE SEMICONDUCTORILOR Un semiconductor este o substanță a cărei principală proprietate este dependența puternică a conductibilității specifice de influența factorilor externi (temperatură, câmp electric, lumină etc) Fiecare electron care alcătuiește un atom are o anumită energie totală sau ocupă un anumit nivel de energie Într-un corp solid, datorită interacțiunii atomilor, nivelurile de energie sunt împărțite și formează zone de energie, constând din niveluri individuale distanțate în energie, al căror număr corespunde numărului de atomi omogene dintr-un corp cristalin dat (Fig) O bandă de energie sau o colecție de mai multe benzi de energie suprapuse care s-au format ca urmare a divizării unuia sau mai multor niveluri de energie ale unui atom individual se numește bandă permisă Electronii dintr-un solid pot avea energii corespunzătoare benzii permise Nivelul de energie superior al zonei permise se numește plafon, iar nivelul inferior de energie se numește partea de jos Nivelurile de energie ale electronilor de valență la divizarea formează o bandă de valență Nivelurile de energie permise libere de electroni în starea neexcitată a atomului, divizându-se, formează una sau mai multe zone libere Cea mai joasă dintre benzile libere se numește bandă de conducție De cel mai mare interes sunt trupa de valență și trupa conductivitate, deoarece din aranjarea lor reciprocă și din grad nici umplerea lor cu electroni nu depinde de proprietățile electrice, optice și alte proprietăți ale solidelor Între benzile permise există intervale de bandă, adică intervalul de valori ale energiei, pe care electronii dintr-un cristal ideal nu le pot poseda Pentru semiconductori (după ce s-a spus), cea mai mare valoare band gap-ul care separă banda de valență și zona de conducere Se caracterizează prin intervalul de bandă LE, adică diferența de energie dintre partea de jos a benzii de conducere și partea de sus a benzii de valență La o temperatură de K, siliciul are un band gap LE = , eV; germaniul are LE = , eV; pentru arseniura de galiu LE = , eV; pentru carbură de siliciu, LE = , + , eV (pentru diferite politipuri) g E-qrp { - } ' {~} mm@ # s{~} X Orez Zone energetice semiconductor: /, , , - zone permise - zone interzise; /, - libere /) zone de jos; - banda de conducere; - zona de valență; Gap de bandă LE Intervalul de bandă se modifică odată cu temperatura Aceasta se întâmplă ca urmare a:) modificări ale amplitudinii vibrațiilor termice ale atomilor rețelei cristaline;) modificări ale distanțelor interatomice, i e volumul corpului Odată cu creșterea temperaturii în primul caz, banda interzisă scade Cu toate acestea, în al doilea caz, poate exista atât o scădere, cât și o creștere a intervalului de bandă Pentru majoritatea semiconductorilor, banda interzisă scade odată cu creșterea temperaturii Dacă există un câmp electric în semiconductor, este recomandabil să construiți diagrame energetice prin reprezentarea grafică a energiei totale a electronilor E -q >P'g>Ng) Odată cu creșterea concentrației de impurități, secțiunile curbelor corespunzătoare conductivității electrice a impurităților se deplasează în sus, adică se obține o concentrație mai mare de purtători de sarcină la temperaturile conductivității electrice a impurităților Panta primei secțiuni a curbei (secțiunea de ionizare a impurităților) scade odată cu creșterea concentrației de impurități, deoarece odată cu creșterea concentrației de impurități datorită interacțiunii atomilor de impurități, nivelurile de energie de impurități se împart, iar energia de ionizare a impurităților scade Prin urmare LEd>LE;>LE'; La o concentrație de

impurități suficient de mare (N';), energia de ionizare a impurităților tinde spre zero, deoarece banda de impurități rezultată se suprapune cu banda de conducție Un astfel de semiconductor este degenerat (semimetal) Temperatura corespunzătoare trecerii de la conductivitatea electrică a impurităților la conductivitatea intrinsecă crește odată cu creșterea concentrației de impurități (de exemplu, T > Tz) Aceasta înseamnă că temperatura maximă de funcționare a unui dispozitiv semiconductor bazat pe un semiconductor cu o concentrație mai mare de impurități va fi, de asemenea, puțin mai mare decât temperatura maximă de funcționare a aceluiași dispozitiv din același material, dar cu o concentrație mai mică de impurități § t TEMPERATURA DEPENDENȚELE MOBILITĂȚII PORTATORILOR DE TARIFICARE ȘI CONDUCTIVITATE SPECIFĂ Mobilitatea purtătorilor de sarcină este influențată în principal de doi factori fizici: vibrațiile termice haotice ale atomilor rețelei cristaline (împrăștierea purtătorilor de sarcină prin vibrațiile termice ale atomilor rețelei cristaline) și câmpurile electrice ale impurităților ionizate (împrăștierea prin ionii de impurități) La temperaturi ridicate predomină împrăștierea purtătorilor de sarcină pe vibrațiile termice ale atomilor rețelei cristaline Prin urmare, odată cu creșterea temperaturii în acest interval de temperatură, mobilitatea purtătorilor scade (Fig) În domeniul temperaturilor scăzute, cu scăderea temperaturii, vitezele termice ale mișcării haotice a purtătorilor de sarcină scad, ceea ce duce la o creștere a timpului de rezidență al purtătorului în apropierea ionului de impurități, adică a duratei acțiunii electricului câmpul ionului de impuritate pe purtătorul de sarcină crește Prin urmare, în gama de mici temperaturi cu scăderea temperaturii, mobilitatea purtătorilor scade și ea (Fig) Odată cu creșterea concentrației de impurități, crește și împrăștierea ionilor de impurități, adică mobilitatea purtătorilor de sarcină scade Cu toate acestea, în intervalul de temperaturi ridicate, dependența mobilității n- -dependenței conductoarelor de sarcină specifice la diferite punți semiconductoare la concentrații de impurități la diferite concentrații de impurități, împrăștierea prin vibrații termice a atomilor rețelei cristaline și, în consecință, curbele dependenței de temperatură a rețelei cristaline mobilitatea purtătorilor de sarcină în domeniul de temperatură înaltă practic nu se schimbă odată cu creșterea concentrației de impurități Conductivitatea specifică este proporțională cu concentrația purtătorilor de sarcină și mobilitatea acestora Prin urmare, cunoscând efectul temperaturii asupra concentrației și mobilității purtătorilor de sarcină, ne putem imagina și cursul general al curbei care reflectă dependența conductivității specifice de temperatură (Fig) Concentrația purtătorilor de sarcină în semiconductori depinde foarte mult de temperatură - conform legii exponențiale ( ), iar modificarea temperaturii afectează relativ slab mobilitatea - conform legii puterii (excepția o reprezintă semiconductorii de oxid pe bază de oxizi ai metalelor cu valență variabilă) Prin urmare, dependența de temperatură a conductibilității specifice este similară cu dependența de temperatură a concentrației purtătorului la temperaturi foarte scăzute și ridicate În intervalul de temperatură corespunzător epuizării impurităților, când concentrația purtătorilor majoritari de sarcină rămâne practic neschimbată, modificările de temperatură în conductibilitatea specifică se datorează dependenței de temperatură a mobilității § t tO SEMICONDUCTORI IN POWER ELECTRIC câmpuri În câmpurile electrice puternice, procesele fizice pot avea loc într-un semiconductor, ducând la o modificare a conductivității specifice a semiconductorului; caracteristica curent-

tensiune a unui semiconductor încetează să se supună legii lui Ohm; atât concentrația purtătorilor de sarcină cât și mobilitatea acestora se pot modifica Să luăm în considerare mai întâi procesele fizice care afectează concentrația purtătorilor de sarcină Ionizare prin impact Un electron liber (sau gaură), care accelerează sub acțiunea unei intensități mari a câmpului electric, poate dobândi energie suplimentară pe calea liberă medie, suficientă pentru a ioniza o impuritate sau atomul propriu al unui semiconductor Procesul de ionizare a atomilor de către un purtător de sarcină accelerat în câmp se numește ionizare de impact Găurile pot provoca, de asemenea, ionizare, deoarece mișcarea găurilor este doar o modalitate de a descrie mișcarea unui set de electroni în banda de valență a unui semiconductor Cantitativ, procesul de ionizare prin impact este caracterizat prin coeficienți de ionizare prin impact, care sunt numeric egali cu numărul de perechi de purtători de sarcină formate de purtătorul primar pe calea unitară Prin analogie cu teoria descărcării electrice în gaze, coeficienții de ionizare de impact în semiconductori sunt notați cu ap și ap Coeficienții de ionizare de impact depind foarte puternic de puterea câmpului electric Pentru calcule practice, se folosește adesea aproximarea empirică ( ) unde m este un exponent destul de mare, diferit pentru diferite materiale (de la la) tunelare Un câmp electric puternic într-un semiconductor corespunde unei pante mari a benzilor de energie (Fig) În acest caz, electronii pot trece printr-o barieră îngustă de potențial (grosime L) fără a-și schimba energia - ei pot face tunel datorită proprietăților lor mecanice cuantice Deoarece procesul de tunelare are loc datorită tranziției electronilor din banda de valență în banda de conducție, acest proces poate fi considerat analog emisiei de câmp sau emisiei la rece a electronilor dintr-un metal Probabilitatea tranziției electronilor de la banda de valență la banda de conducție și invers de la banda de conducție la banda de valență este aceeași Dar transferul de electroni din banda de valență prevalează, deoarece sunt mult mai mulți decât în banda de conducere - Fig Tuneluri Prin urmare, concentrația purtătorilor de încărcare cu electroni crește în timpul tunelării de la banda de valență la Efect de tunel în semiconductori banda de conducție se manifestă la tensiuni foarte mari - cu o electrică puternică câmp chimic în semilegaturile câmpului electric: în siliciu-conductor la E ~ V / cm, în germaniu - la E ~ ~ V / cm Intensitățile câmpului electric la care apare efectul de tunel sunt diferite pentru diferite materiale, deoarece grosimea barierei de potențial (L) depinde de banda interzisă a semiconductorului la o intensitate constantă a câmpului electric, adică cu o pantă constantă a energiei benzi Să luăm acum în considerare influența unui câmp electric puternic asupra mobilității purtătorilor de sarcină Răspândirea purtătorilor de încărcare în câmpuri puternice În câmpurile electrice slabe, purtătorii de sarcină dobândesc relativ puțină energie pe calea lor medie liberă Prin urmare, distribuția lor pe niveluri de energie corespunde distribuției la o anumită temperatură a rețelei cristaline În acest caz, vitezele de derivă ale purtătorilor de sarcină sunt mult mai mici decât așa-numitele viteze termice, τ e vitezele mișcărilor haotice termice În câmpurile electrice puternice, viteza de derivă a purtătorilor de sarcină este proporțională cu viteza termică; purtătorii de sarcină pe calea liberă medie dobândesc în câmpul electric energii corespunzătoare energiilor cinetice ale mișcării haotice termice În acest caz, distribuția purtătorilor de sarcină pe niveluri de energie corespunde unor temperaturi mai mari decât temperatura rețelei cristaline, care rămâne practic neschimbată

Acest fenomen este uneori numit încălzire purtător Fenomenul de încălzire poate afecta mobilitatea transportatorilor în moduri diferite La temperaturi relativ ridicate, la care mobilitatea purtătorilor de sarcină este determinată în principal de procesul de împrăștiere pe vibrații termice '(CH/s atomilor rețelei cristaline a unui conductor semi- , încălzirea purtătorilor de sarcină de către un câmp electric duce la o creștere diferența dintre numărul de ciocniri ale purtătorilor cu atomii rețelei cristaline, adică la saturația vitezei de derivă sau la o scădere a mobilității cu o creștere a puterii electrice câmp (Fig) Este acest fenomen care trebuie luat în considerare în dispozitivele semiconductoare dacă câmpurile electrice o-to "E , / c depășesc valoarea de - V / cm Fig Dependența vitezei de derive și mișcarea La temperaturi relativ scăzute Iusti purtători de taxe din ratura la care mobilitatea nou proces de împrăștiere pe ion-Zirovannyh impurități, încălzirea purtătorilor de către un câmp electric duce la o scădere a timpului petrecut de purtător în câmpul unei impurități ionizate, adică la o scădere a împrăștierii purtătorilor și, în consecință, la o creștere a mobilității Prin urmare, o creștere a mobilității odată cu creșterea intensității câmpului electric în dispozitivele semiconductoare poate apărea numai la temperaturi foarte scăzute Tranziția pe intervale a purtătorilor de sarcină Să considerăm mai întâi dependența energiei unui electron liber în vid de impulsul său P (Fig) Energia unui astfel de electron P E \u d - - \u d - - \u d - mov m v luni luni' unde V este vectorul viteză al unui electron liber; atunci este masa lui Dependenţa prezentată în fig ·, este diagrama energetică a electronilor liberi în vid, reprezentată în spațiul impulsului sau în spațiul vectorilor de undă k (P=pk= ;n k) Într-un cristal semiconductor, un electron liber poate fi considerat liber doar condiționat, deoarece câmpul potențial periodic al rețelei cristaline acționează asupra unui electron dintr-un cristal Pentru a descrie legile complexe ale mișcării unui electron dintr-un cristal utilizând relații care coincid ca formă cu legile mecanicii clasice, se poate lua în considerare influența forțelor interne asupra unui electron modificând în consecință valoarea masei sale, adică, introducerea conceptului de masă efectivă a unui electron (sau a unei găuri) Astfel, masa efectivă este coeficientul de proporționalitate în legea care raportează forța externă care acționează asupra unui electron dintr-un cristal cu accelerația acestuia Banda de conducere a unui semiconductor poate fi formată din mai multe benzi de energie permise suprapuse Structura benzilor de energie sau diagrama energetică a unui semiconductor în spațiul cvasi-impulsurilor (în spațiul k) poate avea mai multe minime (Fig) De exemplu, în diagrama energetică a arsenidei uh g Axa [! J Orez Energia de dependență-Fig Structura energiei unui electron liber, benzile tic ale arseniurei de galiu în vid, din influența galiului în direcția cristalografică a impulsului său [ ], banda de conducere, pe lângă valea centrală cu un minim de energie la vectorul de undă k = O, are și văi laterale cu o energie minimă , care diferă de precedentul pe LE Din această diagramă energetică rezultă că în banda de conducere a arseniurii de galiu pot exista electroni care au aceeași energie, dar au cvasi-momente diferite și, în consecință, mase efective diferite: (,) Dacă PKR , atunci mf u Astfel, într-un semiconductor (arseniura de galiu) pot exista electroni liberi cu diferite mobilități: electroni "uşori" cu masă efectivă scăzută și mobilitate mare în valea centrală și electroni "grei" cu masă efectivă mare și mobilitate redusă în valea centrală văi laterale În câmpurile electrice slabe, aproape toți electronii liberi au viteze

scăzute de deriva și cvasi-moment și, prin urmare, sunt localizați în valea centrală În câmpuri electrice puternice, electronii liberi, dobândind o energie suplimentară care depășește LE , au ocazia de a merge în văile laterale Acolo se caracterizează printr-o masă eficientă mai mare (devin "grele") și o mobilitate scăzută Din acest motiv, mobilitatea medie a tuturor electronilor liberi scade odată cu creșterea intensității câmpului electric Mobilitățile electronilor "ușori" și "grei" pot diferi Xia de zece ori § Proprietati optice semiconductori Absorbția luminii Există diferite tipuri de absorbție a luminii Când un semiconductor absoarbe cuante de lumină - fotoni - energia lor poate fi transferată electronilor benzii de valență cu transferul acestor electroni în banda de conducție, adică energia cuantelor lumina este folosită pentru ionizarea atomilor semiconductori Acest proces se numește absorbție intrinsecă Există o absorbție a energiei cuantelor luminoase de către electronii liberi ai benzii de conducție sau găurile benzii de valență, adică absorbția de către purtătorii de sarcină În acest caz, energia cuantelor de lumină este cheltuită și pentru a transfera purtători la niveluri de energie mai înalte pentru ei, dar în zona permisă corespunzătoare Este posibilă absorbția de impurități, în care energia fotonului merge la ionizarea sau excitarea atomilor de impurități În plus, semiconductorii pot absorbi fotonii prin rețeaua cristalină și altele tipuri de absorbție Procesele de absorbție a fotonului nu trebuie confundate cu procesele de împrăștiere, care conduc și la o scădere a densității fluxului fotonic uh uh Orez Direct pe-Fig Indirect tranziția electronică de la tranziția va a unui electron de la banda panglică la banda de valență la banda de conducție a semiconductivității semiconductorului semiconductor Cu absorbția intrinsecă a fotonilor, tranziția electronilor de la banda de valență la banda de conducție a unui semiconductor poate avea loc fără a modifica cvasi-impulsul sau vectorul de undă electron, adică sunt posibile tranziții directe (Fig) Poate exista și un transfer de electroni din banda de valență în banda de conducție și cu o modificare a vectorului de undă - tranziții indirecte (Fig) În cazul tranzițiilor indirecte, pe lângă foton și electron, o a treia cvasiparticulă trebuie să participe și la procesul de absorbție, care va prelua o parte din cvasimomentum asupra ei însuși, adică să asigure îndeplinirea legii conservării impulsului Astfel, tranzițiile indirecte sunt tranziții care implică o a treia cvasiparticulă A treia cvasiparticulă este de obicei un fonon - un cuantum de energie termică a rețelei cristaline semiconductoare fia O X Orez Absorbția luminii într-un semiconductor Absorbția luminii sau a fotonilor în general este caracterizată de indicele de absorbție a, care este egal cu modificarea relativă flux luminos (flux fotonic) într-un strat semiconductor de grosime unitară (Fig): di' a=-f~ · Această relaţie este o ecuaţie diferenţială cu variabile separabile De aceea f X ~ di' ~ F - -= -a dx; p- -= -cix și Φ = ΦO exp(-ax) o Fo Astfel, indicele de absorbție a poate fi definit ca reciproca grosimii stratului semiconductor, după trecând prin care fluxul luminos (fluxul fotonic) scade cu e \u d de , ori Dependența indicelui de absorbție de energia fotonilor se numește spectrul de absorbție al unui semiconductor (Fig) La energii fotonice mari, auto-absorbția are loc odată cu formarea de perechi de purtători de electroni-gauri În acest caz, indicele de absorbție este mare La energii fotonice scăzute (mai puțin decât banda interzisă N), crește concentrația la limită a purtătorilor de sarcină minoritari, ceea ce corespunde fenomenului de injecție Cu o tensiune inversă (u x> Distribuția tensiunii Pentru x)

=-q-Nap(X + μ) (d(,) XpEEo Pentru x> , ar trebui să se țină cont de faptul că integrandul din ( ) are o discontinuitate Prin urmare, este indicat să scrieți despre X (~) = q [~ N(x)dx + (N(x)dx] = dx π EEo -\π (,) Astfel, pentru o tranziție p-n bruscă, se obține o dependență liniară a gradientului potențial sau intensității câmpului electric în joncțiunea p-n, cea mai mare valoare a gradientului se obține la contactul metalurgic (Fig) Distribuție potențială Pentru a calcula distribuția potențialului la este necesar să se integreze expresiile pentru gradientul său, adică ( ) și ( ) Orez Distributie con- Apoi Ibentrarea impurităților N(x), densitatea volumului de încărcare-x da g, potențialul (j)p=-q-Nap ~ (x+bp)dx= gradient llq>/dx il potențial q> în res-EEo -b, com p-p-tranziție fără a lua în considerare purtătorii de sarcină ( ) și luând în considerare purtătorii zorilor-( ) da ( ) și q N -dph (,) Este despre Astfel, potențialul într-o tranziție pn ascuțită se modifică odată cu coordonatele de-a lungul unei parabole pătratice (Fig) Raport br/bp Expresiile obținute (~) - ( ) conțin valorile încă necunoscute ale limitelor tranziției pn Folosind condiția de neutralitate electrică ( ), pentru o tranziție pn bruscă primim o b" ~ (-Nap)dx+ ~Nflndx=O; -b, o (,) adică contactul metalurgic împarte tranziția pn ascuțită în părți, ale căror grosimi sunt invers proporționale cu concentrațiile de impurități din regiunile respective În consecință, cu dopajul asimetric, regiunile (ceea ce se întâmplă cel mai adesea) joncțiunea p-n este situată în principal în regiunea cu o concentrație mai mică de impurități Definiţia boundaries și grosimea joncțiunii p-n Pentru a determina limitele unei tranziții pn ascuțite, este recomandabil introduceți grosimea totală a tranziției: b=br+bp Grosimea totală a joncțiunii pn poate fi exprimată în funcție de grosimea uneia dintre părțile sale, ținând cont de ( ): De aici "-" Nap (,) Și Un-U N+N ar dp După ce am găsit grosimea totală a joncțiunii pn, se pot folosi relațiile ( ) pentru a determina coordonatele limitelor sale Pentru a obține o expresie pentru grosimea totală a joncțiunii pn, scriem căderea totală de potențial după integrare ( ) ținând cont de condițiile ( ): CJJkoh-U= :Eo (Nap ~+Nfln ~) (,) Înlocuind relațiile ( ) în ( ), obținem (,) CJJkoh -U - (N+N) VEO ar dp De aici grosimea totală a joncțiunii pn ascuțite ~ -y' Ebo Nap+ N " ( ) UN N {/pictogramă U ( ) q ar dp Tranzițiile pn ascuțite reale (de exemplu, cele aliate) sunt de obicei asimetrice, adică Prin urmare, grosimea unei joncțiuni pn asimetrice ascuțite (,) unde N este concentrația de impurități în regiunea ușor dopată Deși expresia rădăcină conține diferența {/ Pictograma -i, valorile negative ale acestei diferențe nu au un fizic sens Cu tensiuni inverse u , dar nu poate depăși pictograma {/, deoarece pentru u -+ p:> con p-p-tranziție dispare Influența purtătorilor de sarcină Purtătorii de sarcină mobili pot afecta distribuția gradientului de potențial și potențialul într-o joncțiune p-n ascuțită în apropierea granițelor sale și în apropierea metalurgiei • L contact Aproape de limitele tranziției pn, ținând cont de ipotezele adoptate pentru calcule, densitatea de sarcină volumică a impurităților necompensate se modifică brusc de la zero după tranziția pn la o valoare care diferă doar prin factorul q Ppo din N(x), adică, în joncțiunea pn, graficul de distribuție a densității sarcinii în volum diferă de graficul de distribuție a concentrației de impurități numai pe scară (Fig) care tranziția p-n este în starea sarcinii de volum Da, nu poate schimba echilibrul cu un strat invers salt, deoarece această corespondență în regiunea ușor dopată ar avea un gradient infinit al con-tranziției (a) și distribuția purtătorilor de sarcină într-o astfel de centrare a purtătorilor de sarcină și prezența

trecerea ( ) a curenților de difuzie infinit de mari Prin urmare, limitele tranziției pn ar trebui să fie diferite spălate, iar în distribuțiile gradientului potențialului și potențialului ar trebui să existe "COZI" (Fig) În apropierea contactului metalurgic al unei joncțiuni p-n ascuțite asimetrice, concentrația purtătorilor de sarcină poate diferi, de asemenea, în mod semnificativ de a sa, ceea ce este ilustrat de diagrama energetică a joncțiunii p-n în starea de echilibru (Fig) Odată cu asimetria joncțiunii pn - , contactul metalurgic este mai aproape de regiunea puternic dopată, iar scăderea potențialului acolo este mai mică Nivelul Fermi traversează mijlocul benzii interzise nu la contactul metalurgic, ci la partea ușor dopată a joncțiunii pn Tipul de purtători de sarcină predominanți este determinat de poziția reciprocă a nivelului Fermi și a mijlocului benzii interzise: acolo unde nivelul Fermi este deasupra mijlocului benzii interzise, predomină electronii, unde sub - găuri În consecință, limita pentru schimbarea tipului de purtători de sarcină nu coincide dă cu un contact metalurgic, adică într-un anumit strat al părții ușor dopate a joncțiunii pn, tipul purtătorilor de sarcină predominanți (principali) nu corespunde tipului de impurități Un astfel de strat, așa cum este indicat (vezi §), se numește invers § CALCUL ANALIT FINE ELECTRONIC TRANZIȚIA GAURILOR CU DISTRIBUȚIE LINEANĂ NrrJ,g CONCENTRAȚII DE IMPURITATE Legea liniară a distribuției impurităților opi I N(x)=ax, (,) unsprezece aici a este gradientul de concentrație la amestec, care poate fi considerat constant Sau! unsprezece nym la o grosime foarte mică, p-n-transfer cursă comparativ cu grosimea zonei, ! unde concentratia npnMecew este variabila ~ o ?t unsprezece Distribuția tensiunii t t Rezolvarea ecuației ( ) ținând cont de ( ) dă dependența gradientului în - potențial într-o joncțiune p-n netedă cu a distribuția liniară a concentrației G impurități: Fig Distributie con- d kov După cum se poate observa din rezultatele obținute, diferite caracteristici capacități-tensiune ale joncțiunilor pn apar pentru diferite distribuții de impurități Acest lucru face posibilă evaluarea naturii distribuției impurităților în diferite joncțiuni pn De multe ori folosiți și metoda grafică Pentru o tranziție p-p bruscă, caracteristica capacitate-tensiune se dovedește a fi dreaptă în coordonatele / C~ar de la I, iar pentru o tranziție lină cu o distribuție liniară a impurităților, în coordonatele / C~ar de la I (Fig) Dacă punctele experimentale se află pe linii drepte în sistemele de coordonate indicate, atunci aceasta servește drept confirmare (dar nu dovadă) a caracterului de distribuție a impurităților adoptat în construcție Cu toate acestea, caracteristicile capacitate-tensiune sunt legate în mod ambiguu de distribuția impurităților în joncțiunea pn, adică distribuții diferite pot corespunde acelorași caracteristici capacitate-tensiune impurităţi De exemplu, distribuțiile prezentate în fig , da • caracteristici capacitate-tensiune directă în coordonatele / Ciap din I Prin urmare, atunci când se analizează caracteristicile ~ capacitate-tensiune, este necesar să se ia ~ u O 'Rkon O ~e tine cont de informatii suplimentare ai) informații despre tehnologie etc În plus, caracteristicile capacitate-tensiune Orez Dependența caracteristicii de barieră H (oferă posibilitatea op-capacitanței unui ascuțit (a) și neted ( ) p-n-tranzițiile de la constant-determină valoarea contactului compensare de tranziție potențiale la joncțiunea pn (sau înălțimea barierei de potențial pa) La extrapolarea tensiunii N(X) \ / N(X}I / Ciap = (И), segment tăiat ea pe axa tensiunilor pozitive /g g, corespunde valorii diferenței de potențial de contact (vezi Fig Diverse distribuții impurităţi de fisiune, furnizează-fig)

Astfel, avand in vedere acelasi volt-fa metoda de determinare a contactului Caracteristicile caracteristice ale diferenței de potențial p-p-a se bazează pe faptul că la o tensiune de polarizare constantă care tinde spre diferența de potențial de contact, capacitatea barierei tinde spre infinit Necesitatea extrapolării caracteristicii capacitate-tensiune este asociată cu un factor de calitate scăzut, adică cu curenți mari înainte care trec prin joncțiunea pn la tensiuni directe ridicate și, prin urmare, cu imposibilitatea practică de a determina cu exactitate capacitatea de barieră a joncțiunii Pentru comoditatea extrapolării, este necesar să alegeți coordonatele în care caracteristica capacitate-tensiune a tranziției studiate corespunde unei linii drepte § TRANZIȚIE OHMICĂ LA CONTACT SEMICONDUCTOARE CU UN SINGUR TIP CONDUCTIVITATE ELECTRICĂ La contactul a doi semiconductori cu conductivitate electrică de același tip, dar cu valori diferite ale conductibilității electrice, au loc procese similare cu cele din joncțiunea pn, adică purtători de sarcină dintr-o regiune cu o concentrație mai mare difuzează într-o regiune cu o concentrație mai mică În regiunea puternic dopată, compensarea sarcinii impurităților ionizate este perturbată, iar în regiunea ușor dopată se creează un exces de purtători de sarcină principali (Fig , c) Astfel, la contactul a doi semiconductori cu conductivitate electrică de același tip, dar cu valori diferite ale conductibilității electrice, se formează și o regiune de încărcare spațială, un câmp electric de difuzie și o diferență de potențial de contact Dar n+ n aD spre deosebire de tranziția pn, în acest caz, în regiunea ușor dopată, sarcina spațială se formează ca urmare a unei concentrații în exces a bazei purtători de taxe Stratul de tranziție dintr-un semiconductor între două regiuni cu conductivitate electrică de tip n, care au diferite -tt -g zf n valori ale conductivității electrice specifice-) t Ji conductivitate, în care există există o difuzie electrică le, se numește tranziție electron-electron (n-p + tranziție) Procese similare apar lângă interfața dintre două regiuni N(X),П • semiconductor cu conductivitate electrică de tip p Stratul de tranziție dintr-un semiconductor între două regiuni cu conductivitate electrică de tip p, care au valori diferite de conductivitate electrică, în care există un câmp electric de difuzie, numit gaură-Fig Tranziție ohmică tranziție de găuri (pp+-tranziție) între semiconductori cu semnul "+" (plus) în acești termeni un tip de fir electric ness: condiționat înseamnă o zonă cu mai mult decât o structură de tranziție; - schema electrică proenergetică specifică înaltă; c - conductivitate, adică cu o dependență de concentrație mai mare a concentrației de impurități și a concentrației de purtători radio ai impurității corespunzătoare taxa de la coordonata Diferența de potențial de contact la astfel de tranziții este determinată de relații similare cu ( ): (/jKoll=-n ; ( ) q n "o pentru pp+-tranziție kT I pp+o {/)con=-P (,) q pro Distribuția purtătorilor de sarcină în joncțiunea p-n + (Fig , c) arată că, spre deosebire de joncțiunea p-p, în acest caz nu există un strat epuizat - un strat cu o concentrație mai mică a purtătorilor principali de sarcină în comparație cu concentrația de purtători de sarcină în regiunea slab dopată Când o tensiune externă este aplicată unei structuri cu o joncțiune n-p+, aproape toată tensiunea scade în regiunea ușor dopată (de înaltă rezistență) Prin urmare, înălțimea barierei de potențial la joncțiunea np+ nu depinde de polaritatea tensiunii aplicate și de valoarea acesteia Astfel, tranziția p-p + (și p-p + tranziția) are o rezistență scăzută în comparație cu rezistența unei regiuni ușor aliate și nu are proprietăți de rectificare Tranziție, rezistență electrică rgo nu depinde de

direcția curentului n + n în intervalul de valori dat, atunci-Fig Acumularea de non-baze, numită tranziție ohmică, de purtători de sarcină (găuri) - purtători de sarcină într-o regiune ușor dopată cu conductivitatea electrică a câmpului tric de tip n Într-adevăr, dacă o tensiune externă este aplicată printr-un potențial pozitiv regiunii n a joncțiunii n-n+, care este analogă ; cu pornirea directă a joncțiunii p-n, atunci electronii sunt introduși din regiunea n+ în n-regiune, care sunt principalii purtători de taxe Cu polaritate opusă, curentul de gaură din regiunea n+ în regiunea n este similar cu curentul invers prin joncțiunea pn Cu toate acestea, din cauza concentrației neglijabil de scăzute de purtători de sarcină minoritari în regiunea n+ puternic dopată [vezi (\,)] fluxul de găuri în regiunea n de înaltă rezistență se dovedește, de asemenea, a fi neglijabil de mic Joncțiunile ohmice și neinjectabile sunt utilizate pe scară largă în dispozitivele semiconductoare, împreună cu cele de rectificare și injectare Cu toate acestea, datorită existenței unei bariere potențiale la joncțiunea n-p+ (și la joncțiunea pp+) pentru purtătorii de sarcină minoritari care se deplasează din regiunea ușor dopată către joncțiune, acești purtători minoritari se pot acumula în apropierea joncțiunii la o anumită polaritate de tensiunea externă (Fig) Când se aplică o tensiune externă, aceasta se încadrează în principal în volumul unei regiuni ușor dopate, unde are loc o pantă a nivelurilor de energie și a benzilor, ceea ce duce la formarea unui put de potențial pentru purtătorii de sarcină minoritari Efectul acumulării de purtători minori de sarcină și resorbția lor ulterioară este un efect inerțial Prin urmare, poate degrada performanța dispozitivelor semiconductoare § JONCȚIUNI DE RECTIFICARE ȘI OHMICĂ Hg ÎN METODA CONTACT CU UN SEMICONDUCTOR În cazul contactului ideal al unui metal cu un semiconductor (adică, în absența oricăror straturi intermediare care diferă ca compoziție chimică și fără a lua în considerare stările de suprafață la interfață) , difuzia electronilor are loc în principal din material, cu o funcție de lucru mai mică a electronilor într-un material cu o funcție de lucru mai mare Prin funcția de lucru a electronilor înțelegem energia necesară pentru a transfera un electron de la nivelul Fermi la plafonul zonei libere superioare (fără a scoate electronul în vid la o distanță infinită de suprafața semiconductorului) Ca urmare a difuziei electronilor și a redistribuirii sarcinilor, neutralitatea electrică a regiunilor adiacente interfeței este perturbată, un câmp electric de contact și o diferență de potențial de contact Cf>Koll = (Am -A) / /, ( ) unde Am și AH sunt, respectiv, electronii funcției de lucru din meta g ~ la şi dintr-un semiconductor Stratul de tranziție, în care există un câmp electric de contact (sau difuzie) și care se formează în re- Rezultatul contactului dintre un metal și un semiconductor se numește tranziția Shatky, după omul de știință german W Shatky, care a obținut primul relațiile matematice de bază pentru caracteristicile electrice ale tranzițiilor Câmpul electric de contact la joncțiunea Shatka este concentrat practic numai în semiconductor, deoarece concentrația purtătorilor de sarcină în metal este mult mai mare decât concentrația purtătorilor de sarcină în semiconductor Redistribuirea electronilor într-un metal are loc într-un strat foarte subțire comparabil cu distanța interatomică În funcție de tipul de conductivitate electrică a semiconductorului și de raportul funcțiilor de lucru din semiconductor, poate apărea un strat epuizat, invers sau îmbogățit (Fig) Dacă funcția de lucru în metal este mai mică decât funcția de lucru în semiconductor (Am An), se obține un strat epuizat sau invers într-un semiconductor de

tip n, iar unul îmbogățit într-un strat de gaură cnoif îmbogățit n O)) eiПнeнiiii layersii Нн рсняйи layers i i i i i a eiпнeнiii cnoif Fig Formarea de epuizat (a), invers ( ) și îmbogățit (c) straturi din semiconductor în apropierea contactului metalurgic cu metalul atunci când funcția de lucru în metal este mai mică decât în semiconductor X a))) Orez Modificarea înălțimii barierei de potențial la joncțiunea redresoare neinjectabilă dintre metal și semiconductor când se modifică tensiunea externă: a - nu există tensiune externă; - tensiune externă directă; c - inversarea tensiunii externe În straturile epuizate, sarcina spațială se formează ca urmare a unei încălcări a compensării sarcinii impurităților ionizate de către purtătorii principali, iar în straturile îmbogățite, datorită acumulării purtătorilor de sarcină principali Stratul îmbogățit determină o rezistență scăzută a regiunii de aproape contact a semiconductorului în comparație cu rezistența majorității semiconductorului Prin urmare, o astfel de tranziție nu are proprietăți de rectificare · În prezența unui strat epuizat sau invers, joncțiunea LII are proprietăți de redresare, deoarece tensiunea externă, căzând în principal la joncțiunea de mare rezistență, va modifica înălțimea barierei sale de potențial, modificând condițiile de trecere a purtătorilor de sarcină prin joncțiunea O trăsătură caracteristică a joncțiunii de redresare Schottky, spre deosebire de joncțiunea pn, este înălțimile diferite ale barierei de potențial pentru electroni și găuri Ca rezultat, injectarea purtătorilor de sarcină minori în semiconductor poate să nu aibă loc prin joncțiunea Schottky Luați în considerare fig Când o astfel de tranziție este activată în direcția înainte (Fig ,), înălțimea barierei de potențial pentru găuri (PBD) în regiunea aproape de contact a semi- n conductor este coborât, găurile vor fi trecerea de la semiconductor la metal Cu cât tensiunea directă este mai mare, cu atât este mai mare probabilitatea unei astfel de tranziții a găurilor Cu toate acestea, înălțimea barierei de potențial pentru electroni (PBE), care se poate deplasa de la metal la semiconductor, rămâne relativ mare Prin urmare, fluxul de electroni de la metal la semiconductor va fi relativ mic, adică practic nu va exista nicio injecție E de purtători de sarcină minori în semiconductor Orez Acumularea neos- Cu o polaritate diferită a noilor purtători de sarcină externi ai tensiunii (cu o tensiune inversă- (găuri) lângă linia ohmică), bariera de potențial pentru găurile de tranziție dintre metal și semiconductor crește în timpul construcției (Fig , c) și mișcarea lor fluxul electric extern prin joncțiune se oprește Pentru câmpul purtătorilor de sarcină minoritari (pentru electroni în acest exemplu), câmpul din joncțiune se dovedește a fi accelerat Prin urmare, trecând prin joncțiune, purtătorii minoritari de sarcină formează un curent invers, care va fi mic datorită concentrației scăzute de purtători minoritari în semiconductor Dacă diferența dintre funcțiile de lucru este mare, atunci se formează un strat invers în regiunea aproape de contact a semiconductorului (vezi Fig ,) În acest caz, la tensiuni directe joase, purtătorii de sarcină minoritari vor fi injectați printr-o astfel de joncțiune din stratul invers în masa adiacentă a semiconductorului La tensiuni directe ridicate, stratul invers poate dispărea În tranzițiile ohmice formate ca urmare a contactului dintre un metal și un semiconductor, se poate produce o acumulare de purtători minoritari de sarcină datorită formării unui puț de potențial pentru purtătorii minoritari în regiunea aproape de contact a semiconductorului (Fig) Un astfel de fenomen, așa cum este menționat în § , poate afecta viteza dispozitivelor semiconductoare Pentru a elimina acest fenomen, este necesară

eliminarea barierei de potențial la contactul metal-semiconductor prin selectarea perechilor de materiale de contact cu aceeași funcție de lucru Cu toate acestea, acest lucru este practic imposibil din cauza setului limitat de materiale și a necesității de a selecta din nou metalul pentru fiecare concentrație de impurități din semiconductor și pentru fiecare temperatură Pentru a elimina efectul acumulării purtătorilor de sarcină minoritari în semiconductorul din apropierea contactului, poate fi efectuată dopaje suplimentară a regiunii de aproape contact a semiconductorului În acest caz, bariera de potențial rămâne, dar grosimea acesteia va fi foarte mică datorită dopajului puternic al regiunii de aproape contact a semiconductorului Grosimea mică a barierei de potențial va face posibil ca purtătorii de sarcină minoritari să pătrundă în metal din puțul de potențial din semiconductor § HETEROJONCȚII O heterojuncție este un strat de tranziție cu un câmp electric de difuzie existent acolo între doi semiconductori de compoziție chimică diferită Când se formează o heterojuncție, datorită diferitelor funcții de lucru ale electronilor din semiconductori diferiți, purtătorii de sarcină sunt redistribuiți în regiunea aproape de contact și egalizează J) Orez Diagrame energetice ale heterotranziției mișcări: a - heterojoncția de rectificare între semiconductor- nichel cu conductivitate electrică de tip p și p cu injecție preferențială de electroni într-un semiconductor cu distanță îngustă; - redresarea heterojoncției dintre semiconductori cu conductivitate electrică de tip n fără injectarea de purtători minori de sarcină în baia de niveluri Fermi ca urmare a stabilirii echilibrului termodinamic (Fig) Toate celelalte niveluri de energie și benzi ar trebui să se îndoaie în consecință, adică un câmp electric de difuzie și o diferență de potențial de contact apar în heterojoncție În acest caz, nivelul de energie al plafonului zonei libere superioare trebuie să fie continuu De obicei, nivelul de energie al plafonului benzii libere superioare este nivelul de energie al plafonului benzii de conducere, deoarece benzile de energie liberă se suprapun Diferența de potențial de contact care apare pe hetero- joncțiunea este determinată de deplasarea relativă a plafonului benzii superioare libere a semiconductorilor care formează heterojoncțiunea Lățimea benzilor de energie ale diferitelor semiconductori este diferită Prin urmare, la interfața dintre doi semiconductori (la contactul metalurgic al heterojoncțiunii), se obține de obicei o discontinuitate a fundului benzii de conducere Discontinuitatea fundului benzii de conducție este determinată de diferența de energii de afinitate electronică a celor doi semiconductori în contact (energia afinității electronilor este diferența dintre energiile din partea superioară a benzii superioare libere și cele din partea inferioară a benzii de conducere) Ruperea în partea superioară a benzii de valență depinde atât de diferența dintre energiile de afinitate, cât și de diferența dintre benzile interzise ale semiconductorilor în contact Ca urmare a întreruperii în partea inferioară a benzii de conducție și în partea superioară a benzii de valență, înălțimile barierelor de potențial pentru electroni și găurile din heterojuncție se dovedesc a fi diferite Aceasta este o caracteristică a heterojoncțiilor, care determină proprietățile specifice ale heterojoncțiilor, spre deosebire de joncțiunile pn, care sunt formate într-un singur cristal al unui singur semiconductor Fiecare dintre semiconductorii care formează heterojoncția poate avea un tip diferit de conductivitate electrică Prin urmare, pentru fiecare pereche de semiconductori, în principiu, este posibil să se efectueze răsuciți patru tipuri de heterostructuri: p -n ; p -p ; P I-P și P -P

Dacă în apropierea interfeței dintre doi semiconductori care formează o heterojuncție, apar straturi epuizate în purtătorii principali (straturi cu rezistivitate crescută), atunci partea principală a tensiunii externe aplicată structurii cu o heterojoncție va scădea pe straturile epuizate Înălțimea barierei de potențial pentru purtătorii de sarcină principale se va modifica: scăderea odată cu polaritatea tensiunii externe, polaritatea opusă a diferenței de potențial de contact și crește atunci când polaritățile tensiunii externe și diferența de potențial de contact coincid Astfel, heterojoncțiile pot avea un efect de rectificare (Fig) Datorită diferenței de înălțime a barierelor de potențial pentru electroni și găuri, curentul continuu prin heterojoncțiune este cuplat la în principal cu deplasarea purtătorilor de sarcină de un singur semn Prin urmare, heterojoncțiile pot fi atât purtători minoritari injectați (Fig , a), cât și neinjectați (Fig ,) Injectarea purtătorilor de sarcină minori are loc întotdeauna dintr-un interval larg într-un semiconductor cu decalaj îngust În heterojoncțiunile formate din semiconductori cu un singur tip de conductivitate electrică, rectificarea are loc fără injectarea purtătorilor de sarcină non-principali De obicei, semiconductorii cu compoziție chimică diferită diferă unul de celălalt prin funcția de lucru a electronilor, lățimea benzii interzise, lățimea benzilor permise și alți parametri Cu toate acestea, pentru formarea unei heterojoncții de înaltă calitate, este necesar să se potrivească tipul, orientarea și perioada rețelelor cristaline ale semiconductorilor de contact, astfel încât rețeaua cristalină a unui semiconductor să fie minimă numărul de încălcări trecute în rețeaua cristalină a altui semiconductor Într-o heterojuncție ideală, nu ar trebui să existe solicitări mecanice, defecte structurale și alte defecte care pot crea condiții pentru o recombinare intensă și generarea de purtători de sarcină - capcane de recombinare În prezența unui număr mare de capcane de recombinare într-o heterojuncție, mecanismul de trecere a curentului printr-o astfel de heterojuncție reală poate diferi semnificativ de mecanismul de trecere a curentului printr-o heterojuncție ideală Este posibil ca o astfel de heterojuncție să nu aibă un efect de rectificare Pe lângă proprietățile specifice considerate ale heterojoncțiilor (rectificare cu un coeficient de injecție ridicat într-un semiconductor cu distanță îngustă, rectificare fără injectare de purtători minoritari la o heterojoncție din semiconductori cu un tip de conductivitate electrică), dispozitivele semiconductoare sunt de interes și utile sunt diferențele de spectre de absorbție și indici de refracție ai semiconductorilor care formează heterojoncția Cele mai utilizate în dispozitivele semiconductoare sunt heterojoncțiunile dintre semiconductori de tip lshvv și soluțiile lor solide pe bază de arseniuri de galiu și aluminiu, fosfuri și antimonide Datorită apropierii de covalent razele de galiu și aluminiu, modificarea compoziției chimice a semiconductorilor din heterojoncțiune are loc fără modificarea perioadei rețelei cristaline Heterojoncțiunile sunt create și pe baza soluțiilor solide multicomponente (cuaternare și mai multe), în care perioada rețelei nu se modifică atunci când compoziția se modifică într-un interval larg Principala metodă de formare a heterostructurilor este metoda creșterii epitaxiale a cristalelor semiconductoare Toate tipurile de tranziții electrice considerate mai devreme (joncțiunea p-n, joncțiunea p+, tranziția p+, tranziția Schottky) pot fi considerate cazuri speciale ale tipului general de tranziții electrice - heterojoncțiune §l tl PROPRIETĂȚI ȘI PARAMETRI AI TRANZIȚIILOR OHMICE Cerințe pentru ohmic tranziții Tranzițiile ohmice

sunt de mare importanță în dispozitivele semiconductoare și în cercetarea semiconductoarelor Scopul principal al joncțiunilor ohmice este conexiunea electrică a unui semiconductor cu părțile conductoare metalice ale unui dispozitiv semiconductor Există mai multe tranziții ohmice în dispozitivele semiconductoare decât cele de rectificare Cazurile de defecțiuni și defecte de fabricație ale dispozitivelor semiconductoare din cauza calității slabe a tranzițiilor ohmice sunt destul de frecvente În dezvoltarea dispozitivelor semiconductoare, crearea de joncțiuni ohmice perfecte necesită adesea mai mult efort decât crearea de joncțiuni de redresare În ciuda acestui fapt, teoria tranzițiilor ohmice este mai puțin dezvoltată decât teoria tranzițiilor electron-gaură, iar formarea tranzițiilor ohmice se bazează adesea pe experiment Tranziția ohmică are un efect mai puțin negativ asupra caracteristicilor și parametrilor unui dispozitiv semiconductor în următoarele condiții:) dacă nu există injecție de purtători minoritari de sarcină prin joncțiunea ohmică în regiunea adiacentă a semiconductorului și acumularea de purtători minoritari în sau în apropierea joncțiunii ohmice;) cu căderea minimă posibilă de tensiune pe joncțiunea ohmică, adică cu rezistența sa minimă;) dacă BAH-ul tranziției ohmice este liniar, adică dacă tranziția ohmică este într-adevăr ohmică Parametri ohmici tranziții Pentru a putea stabili în ce măsură o tranziție ohmică satisface cerințele impuse acesteia și pentru a putea compara între ele diferite tranziții ohmice, este necesar să se introducă parametrii cantitativi care caracterizează aceste tranziții Rata de recombinare la tranziția ohmică Rata de recombinare la o tranziție ohmică arată cât de mult se poate abate concentrația purtătorilor de sarcină din apropierea acesteia de la concentrația de echilibru Rata de recombinare la tranziția ohmică este introdusă în mod similar cu rata de recombinare la suprafață [vezi ( )] ca raport dintre densitatea de flux a purtătorilor de sarcină prin joncțiune și concentrația în exces a acestor purtători la joncțiune, i e Dimensiunea vitezei de recombinare la tranziția ohmică la fel ca și dimensiunea vitezei de mișcare, deoarece densitatea fluxului purtător este produsul concentrației și vitezei (Φp=pvp) Evident, cu cât rata de recombinare este mai mare, cu atât mai mică este abaterea concentrației purtătorului de la valoarea de echilibru pentru un flux de purtător dat, cu atât calitatea tranziției ohmice este mai mare La o densitate mare a fluxului purtătorului de sarcină, concentrația la limită depășește semnificativ concentrația de echilibru a acelorași purtători (Pgr " ro), deoarece viteza de mișcare a purtătorului este limitată Prin urmare, S -Fr -RgrVr , , V r Rgr -Ro Rgr -Ro , , r Astfel, viteza de recombinare la tranziția ohmică nu pre- crește viteza de mișcare a purtătorilor de sarcină Dacă transferul purtătorilor de sarcină la tranziție este cauzat de difuzie, atunci viteza de mișcare nu poate depăși Po ,, ~viteza termică Dacă transferul de purtători-/"""" -" -/ de transportatori este cauzat de deriva, atunci viteza este limitată și de valoarea vitezei maxime, care este de ordinul vitezei termice (vezi § O) Orez Dependența de grafic Astfel, rata de recombinare la cea mai mică concentrație de purtători de sarcină în apropierea tranziției ohmic-ohmice nu depășește a tranziției termice de la curgerea sau viteza termică a mișcării purtătorilor de la densitatea de curent a acestor purtători-sarcini Acest lucru este de importanță practică, deoarece nu are sens să încercăm să îmbunătățim tranzițiile ohmice, rata de recombinare la care se apropie de maximul posibil, În fig arată dependențele concentrației la limită a purtătorilor de sarcină în apropierea ohmicului ideal tranziție cu o rată de recombinare infinit

mare (/), pentru un real ■ -=tranziție ohmică cu re- combinatii egale cu maximul tensiunea la tranziția vitezei posibile de deplasare este purtată prin extrapolarea distribuției lei ( ), iar pentru ohmic real împărțind potențialul în semijoncțiunea cu viteza de recombinare, conductorul nedepășind viteza maximă a transportatorilor ( ) Rezistență de tranziție ohmică Rezistența unei joncțiuni ohmice este raportul dintre căderea de tensiune pe joncțiune și curentul care trece prin ea: Rom lane = LI// Cu cât rezistența tranziției ohmice este mai mică, cu atât este mai bună Pentru a clarifica semnificația căderii de tensiune pe joncțiunea ohmică, să realizăm mental următorul experiment Să treacă un curent prin tranziția ohmică între un semiconductor sub formă de prismă sau cilindru și un electrod metalic (Fig) Potențialul din semiconductor trebuie distribuit liniar Acest lucru poate fi verificat prin efectuarea de măsurători cu ajutorul sondelor Dacă una dintre sonde este plasată pe un electrod metalic, atunci valoarea potențialului rezultat nu cade pe o dependență liniară Sub căderea de tensiune la joncțiunea al oJ abaterea tensiunii trebuie înțeleasă pe electrodul metalic din valoarea obţinută prin extrapo-Fig BACH lații ohmice ale distribuției potențialului în tranziții: a - tranziție ohmică, care are un anumit efect într-un semiconductor La determinarea practică a căderii de tensiune la borne îndreptare; Joncțiunea de ohmi nu trebuie să aibă o semijoncțiune cu rezistență, pentru- atarnat de atasat un conductor sub formă de prismă sau lindr chi-spinning, este necesar doar să se stabilească distribuția reală a potențialului în el pentru a putea extrapola Rezistența unei joncțiuni ohmice depinde de aria sa Prin urmare, este posibil să se compare joncțiuni cu aceeași zonă sau să se introducă rezistivitatea unei joncțiuni ohmice, care este determinată de împărțind-o ca raport dintre căderea de tensiune pe joncțiune și densitatea curentului care trece: QoM nep = LI/D (,) Unitatea de măsură a rezistivității unei joncțiuni ohmice este Ohm cm Rezistența joncțiunii este legată de rezistivitatea joncțiunii: ROM pec = ohm per / Parametrii de liniaritate În funcție de ce cerințe sunt impuse liniarității caracteristicii curent-tensiune (CVC) a tranziției ohmice și de ce tip de neliniaritate, aceasta poate fi caracterizată și evaluată în moduri diferite Dacă o tranziție ohmică reală are un efect de redresare (Fig , a), atunci neliniaritatea caracteristicii I-V poate fi estimată prin factorul de redresare, adică raportul dintre curent continuu și curent invers la valori egale a tensiunilor directe și inverse aplicate O joncțiune ohmică ideală ar trebui să aibă un factor de rectificare egal cu unu Neliniaritatea CVC simetrică a unei tranziții ohmice (Fig , b) poate fi estimată prin coeficientul de neliniaritate - raportul dintre rezistența statică și rezistența diferențială la o valoare dată a componentei curentului constant prin tranziție O joncțiune ohmică ideală cu o caracteristică liniară I-V va avea un coeficient de neliniaritate egal cu unitatea Structura realului contact nerectiv Structura unui contact real neredresator în dispozitivele semiconductoare care satisface cerințele enumerate niyam, are o structură relativ complexă și constă din mai multe tranziții ohmice conectate în serie (Fig) Pentru o probabilitate mai mică de acumulare a purtătorilor de sarcină minori în apropierea tranziției ohmice dintre un metal și un semiconductor , înălțimea potențială a barierei pentru purtătorii de taxe minoritare ar trebui să fie cât mai mică posibil aici Prin urmare, este de dorit să se selecteze un metal cu o funcție de lucru care ar diferi puțin de funcția de lucru a electronilor dintr-un semiconductor (vezi §) Deoarece acest lucru este dificil de asigurat, apoi pe deasupra Orez Structura realului stratul

semiconductor al semiconductorului trebuie să fie în serie cu o serie de peșteri puternic dopate cu peșterile ohmice corespunzătoare cu o impuritate pentru a asigura tranzițiile permit tunelarea purtătorilor de sarcină printr-o barieră subțire de potențial În apropierea tranziției ohmice între semiconductori cu aceeași conductivitate electrică, dar cu grade diferite de dopaj, poate, de asemenea, există o acumulare de purtători de taxe minori (vezi §) Pentru a reduce influența acestui efect asupra caracteristicilor și parametrilor unui dispozitiv semiconductor, este recomandabil să se introducă impurități ale capcanelor de recombinare (de exemplu, aur) în stratul de suprafață al semiconductorului, ceea ce va reduce durata de viață a purtătorilor de sarcină în acest parte a structurii Cu o durată de viață scurtă, purtătorii de încărcare acumulați se vor recombina rapid, adică procesul de resorbție a acestora va avea un efect mai mic asupra caracteristicilor și parametrilor dispozitivului Cu toate acestea, în contactele reale care nu se redresează, se formează adesea diverse straturi intermediare, care înrăutățesc proprietățile tranzițiilor ohmice Prin urmare, rafinarea finală a con-logiei tehnologice nerectificatoare a fabricării lor se realizează experimental Întrebări de control I Ce este o tranziție electron-gaură? Cum și de ce se modifică înălțimea barierei potențiale a unei joncțiuni pn cu temperatura și concentrațiile de impurități în regiunile adiacente joncțiunii? Ce este injectarea și extragerea purtătorilor de sarcină minori? Ce determină concentrația purtătorilor de sarcină minoritari la granițele joncțiunii p-n? Cum se poate scrie condiția pentru neutralitatea electrică a unei joncțiuni pn și care este semnificația fizică a acestei stări? Cum sunt distribuite intensitatea câmpului electric și potențialul în tranziții pn ascuțite și netede? Cum se schimbă curentul tranzițiilor p-n ascuțite și netede odată cu modificarea tensiunii aplicate? Care este capacitatea de barieră a unei joncțiuni pn? Cum se determină diferența de potențial de contact la joncțiunea p-n folosind caracteristicile experimentale de capacitate-tensiune ale acestei joncțiuni? De ce este o tranziție electrică între doi semiconductori identici cu același tip de conductivitate electrică, dar cu concentrații diferite de impurități, ohmică și care nu injectează purtători de sarcină minoritari în regiunea de înaltă rezistență? II În ce condiții tranziția electrică dintre un metal și un semiconductor va fi ohmică? În ce condiții se va rectifica tranziția electrică între un metal și un semiconductor fără injectarea de purtători de sarcină minori în semiconductor? În ce caz poate avea loc acumularea de celule de sarcină minoritare în apropierea unei tranziții ohmice între un metal și un semiconductor? Care sunt regulile pentru construirea diagramelor energetice ale heterojoncțiilor? De ce și în ce condiții pot fi rectificate heterojoncțiile fără injectarea de purtători de sarcină minori? De ce se poate observa un efect de rectificare pe o heterojoncție între doi semiconductori cu același tip de conductivitate electrică? Ce cerințe trebuie să îndeplinească tranzițiile ohmice? Care este viteza de recombinare la o tranziție ohmică? Care este rezistența unei tranziții ohmice și cum poate fi determinată experimental? Care este factorul de rectificare și de ce această setare este aplicabilă numai atunci când există un efect de rectificare slab? Care este coeficientul de neliniaritate al caracteristicii I-V a unei tranziții ohmice? capitol Semiconductor DIODE § t STRUCTURA ȘI ELEMENTELE PRINCIPALE O diodă semiconductoare este un dispozitiv semiconductor cu o joncțiune electrică de redresare și două cabluri, care utilizează una sau alta proprietate a joncțiunii

electrice redresoare Ca joncțiune electrică de redresare în diodele semiconductoare, poate exista o joncțiune electron-gaură, o heterojuncție sau o joncțiune de redresare formată în rezultatul contactului dintre un metal și un semiconductor (tranziție Schottky) Într-o diodă cu joncțiune pn sau cu heterojoncțiune, pe lângă joncțiunea de redresare, trebuie să existe două joncțiuni ohmice prin care regiunile p și p ale diodei să fie conectate la cabluri (Fig , a) Într-o diodă cu o joncțiune electrică redresoare sub forma unui contact între un metal și un semiconductor, există o singură joncțiune ohmică (Fig ,) De obicei, diodele semiconductoare au joncțiuni p-n dezechilibrate Prin urmare, odată cu polaritatea tensiunii externe, la care bariera de potențial din joncțiunea p-n scade, adică cu direcția înainte pentru joncțiunea p-n, numărul de purtători de sarcină injectați din zona puternic dopată în regiunea ușor dopată este mult mai mare decât numărul de purtători care trec în sens opus În conformitate cu definiția generală (vezi §), regiunea unei diode semiconductoare în care are loc injectarea purtătorilor de sarcină minori pentru această regiune se numește baza diodei Deci, într-o diodă, regiunea de bază este regiunea ușor dopată Dacă se aplică o tensiune unei diode cu o joncțiune pn asimetrică, la care bariera de potențial din joncțiunea pn se ridică, adică în direcția opusă joncțiunii pn, atunci extragerea purtătorilor de sarcină minori va avea loc mai ales de la bază a diodei Astfel, baza diodei poate avea un impact semnificativ asupra caracteristicilor și parametrilor diodei În funcție de raportul dintre dimensiunile liniare ale tranziției electrice redresoare și lungimea caracteristică, se disting diode plane și punctiforme Lungimea caracteristică pentru o diodă este cea mai mică dintre cele două mărimi care determină proprietățile și caracteristicile diodei: diferențială r unsprezece n P n," aJ n m il semipro oijHllff fl BH) Orez Structuri ale diodelor semiconductoare: a - cu o joncțiune electrică redresoare sub forma unei joncțiuni p-p; - cu o tranziție electrică redresoare la contactul dintre metal și semiconductor; B - rectificarea tranzițiilor electrice; H - nerectificator, adică ohmic tranzițiile sunt lungimea de fuziune a purtătorilor de sarcină minoritari în bază sau grosimea bazei O diodă plană este o diodă ale cărei dimensiuni liniare, care determină aria joncțiunii electrice de redresare, sunt mult mai mari decât lungimea caracteristică O diodă se numește diodă punctiformă, în care dimensiunile liniare, care determină aria joncțiunii electrice de redresare, sunt mult mai mici decât lungimea caracteristică În joncțiunea electrică de redresare și zonele adiacente acesteia au loc diverse procese fizice, care pot duce la efectul de redresare, la un neliniar o creștere a curentului cu creșterea tensiunii, la o multiplicare avalanșă a purtătorilor de sarcină în timpul ionizării prin impact a atomilor semiconductori, la tunelarea purtătorilor prin bariera de potențial a unei tranziții electrice de redresare atât în sens invers, cât și în anumite condiții și la tensiune directă, la o schimbare în capacitatea de barieră cu o modificare a tensiunii, ca efect al acumulării și resorbției purtătorilor de sarcină minoritari în regiunile adiacente joncțiunii de redresare Toate aceste efecte sunt folosite pentru a crea diferite tipuri de diode semiconductoare: diode redresoare, de amestecare, detectoare și comutatoare, diode cu o recuperare bruscă a rezistenței inverse, diode zener, stabistori, zgomot, avalanșă-span, tunel și diode inversate, varicaps Unele dintre aceste efecte sunt nedorite și chiar dăunătoare la unele diode, dar la alte diode aceleași efecte pot servi ca bază pentru principiul de

funcționare § CARACTERISTICI VOLT-AMPERI ALE DIODEI ÎN TIMPUL INJECȚIEI ȘI EXTRACȚIEI UNUI SUPORT DE ÎNCĂRCARE Conectarea directă a diodei Cu o tensiune directă pe diodă, tensiunea externă compensează parțial diferența de potențial de contact la joncțiunea p-n, deoarece câmpul electric extern în timpul conexiunii directe a diodei este direcționat opus câmpului de difuzie Prin urmare, înălțimea barierei de tranziție de potențial scade proporțional cu tensiunea aplicată diodei Neglijând căderea de tensiune pe baza diodei, luați în considerare dioda la curenți directe mici Odată cu scăderea înălțimii barierei de potențial, crește numărul de purtători de sarcină, care pot depăși bariera de potențial și pot merge în regiunea vecină a diodei, unde vor fi transportatorii minoritari (vezi Figura) Acest proces, așa cum este menționat în § , se numește injectarea purtătorilor de sarcină minoritari prin joncțiunea pn Deoarece înălțimea barierei de potențial scade proporțional cu tensiunea aplicată, iar purtătorii de sarcină sunt distribuiți în energie conform legii exponențiale în conformitate cu statisticile Fermi-Dirac sau Max- Io p bine-Boltzmann, atunci ramura directă a CVC a diodei ar trebui să fie similară cu Orez Exponent volt-amper (Fig) caracteristică diodei în timpul injectării și Luați în considerare influența unor fac-extracție purtători de sarcină ai tori la ramura directă a caracteristicii curent-tensiune a diodei Pe măsură ce temperatura diodei crește, înălțimea barierei de potențial scade (vezi §) și distribuția energiei purtătorilor de sarcină se modifică (electronii, de exemplu, ocupă niveluri mai mari de energie în banda de conducție) Din aceste două motive, curentul direct prin diodă crește cu o creștere a temperaturii la o tensiune directă constantă (Fig , a) Dacă comparăm ramurile drepte ale două diode din materiale diferite cu diferite benzi interzise, atunci o diodă realizată dintr-un material cu o bandă interzisă mai mare va avea o înălțime potențială a barierei mai mare (vezi §) Prin urmare, curentul direct printr-o diodă dintr-un material cu un bandgap mai mare va fi mai mic pentru aceeași tensiune directă (Fig ,) Odată cu o creștere a concentrației de impurități în regiunile adiacente joncțiunii pn, înălțimea barierei de potențial a tranziției va crește (vezi §), ceea ce înseamnă că curentul continuu va fi mai mic la aceeași tensiune directă (Fig , c) Diodă inversă Când dioda este pornită din nou, câmpul electric extern și câmpul de difuzie în joncțiunea pn coincid în direcție, extragerea purtătorilor de sarcină minori din Ipr Ipr aprilie J J- IN'>NlJ '>tJ , / o Unp o Unp o Unp aJ)) Orez Ramuri directe ale BAC-ului diodei la diferite temperaturi (a), la diferite benzi interzise ale materiei prime ( ) și la diferite concentrații de impurități în regiunile adiacente joncțiunii p-n (c) r p +Uo p despre A;) Orez Extragerea purtătorilor minoritari din regiunile adiacente joncțiunii p-n la diferite tensiuni inverse pe diodă regiuni care se topesc spre tranziție (vezi § și Fig , e) Acest lucru duce la o scădere a concentrației la limită a purtătorilor de sarcină minoritari în apropierea joncțiunii pn și la apariția difuziei purtătorilor minoritari la tranziție - există un curent de difuzie a purtătorilor non-majori rezultat din generarea termică în volumul p- și p- zonele diodei, precum și pe tranzițiile ohmice În timpul vieții înainte de tranziția p-n, purtătorii minoritari pot difuza, care au apărut în regiunile p și p la distanță ion care nu depășește lungimea de difuzie corespunzătoare (Fig , a, b) Transportatorii minoritari rămași, neavând timp să ajungă la tranziție, se recombină în vrac Acest lucru este valabil pentru diferite tensiuni inverse pe diodă, dacă grosimile regiunilor adiacente joncțiunii depășesc lungimile de difuzie ale purtătorilor de sarcină minoritari

Prin urmare, curentul invers, pornind de la valori foarte mici ale tensiunii inverse, nu se va modifica odată cu modificarea tensiunii (vezi Fig) Acest curent invers prin diodă, care nu se modifică odată cu tensiunea, se numește curent de saturație Luând în considerare procesele fizice dintr-o diodă cu tensiune inversă, este posibil să se exprime densitatea curentului de saturație în funcție de parametrii materialului semiconductor Pentru a face acest lucru, amintiți-vă fir relația generală pentru densitatea de curent în prezența a două tipuri de purtători de sarcină: J = q(pvp +пvп), unde νρ și Vn sunt ratele fie de difuzie, fie de derive a găurilor și a electronilor Într-o diodă, purtătorii de sarcină minoritari difuzează spre joncțiune, astfel încât ratele lor pot fi reprezentate ca lungimi de difuzie împărțite la duratele lor de viață respective În loc de concentrațiile totale p și n, înlocuim concentrațiile purtătorilor minoritari, deoarece curentul invers al diodei este asociat cu mișcarea purtătorilor de sarcină minoritari Apoi ADN = q(Pno ! ::L + pro B) ( ) Tr Tn Dacă luăm în considerare relațiile ( ), precum și ionizarea aproape completă a impurităților la temperatura camerei, atunci ( ) poate fi redusă la forma (Lp + Ln) ADN = qn; -N -N , (,) dptr arTp Odată cu creșterea temperaturii diodei, densitatea curentului de saturație crește, deoarece concentrația intrinsecă a purtătorilor de sarcină crește exponențial cu temperatura [vezi Fig ( )] În diodele bazate pe un material cu o bandă interzisă mai mare, densitatea curentului de saturație ar trebui să fie mult mai mică, deoarece concentrația intrinsecă scade exponențial odată cu creșterea benzii interzise [vezi ( )] Comparând diodele cu germaniu și siliciu și ținând cont de diferența dintre concentrațiile purtătorilor intrinseci în germaniu și siliciu, care este de trei ordine de mărime (a se vedea §), ar trebui să se concluzioneze că densitatea curentului de saturație în diodele cu siliciu ar trebui să fie mai mică de șase ordine de mărime Odată cu creșterea concentrației de impurități în regiunile adiacente joncțiunii, densitatea curentului de saturație în Conform ( ) ar trebui să scadă § CALCULUL DISTRIBUȚIEI MEDIA NON-PRIMARĂ nu ÎNCĂRCARE ÎN BAZA DIODEI Ca exemplu, vom calcula pentru o diodă cu tranziție asimetrică electron-gaură p + -n (Fig) atunci când i se aplică o tensiune, care are o componentă constantă și una mică variabilă: u = u + Omexp jint (,) Aici componenta variabilă este scrisă ca o valoare complexă în formă exponențială Deoarece componentele constante și variabile sunt adăugate numai în ( ) Orez Modelul unidimensional este proiecția vectorului variabilei per-diodă, adoptată pentru calcularea tensiunii pe axa reală Pentru comoditatea transformărilor matematice, alegem următoarea condiție pentru micșorarea componentei variabile a tensiunii: Ut : kT/ q, ( ), adică amplitudinea componentei variabile a tensiunii nu trebuie să depășească - - mV Ipoteze în calcul Pentru a facilita calculele, se alege de obicei un model simplificat al structurii unui anumit dispozitiv În acest caz, să presupunem că:) joncțiunea p-p a diodei este plată, adică vom lua în considerare un model unidimensional al diodei (Fig);) curenții sunt mici și nu provoacă o cădere semnificativă de tensiune pe rezistența de bază a diodei; astfel, câmpul electric este concentrat doar în joncțiunea pn;) tranzițiile ohmice sunt ideale, adică în jurul lor într-un semiconductor există întotdeauna doar o concentrație de echilibru a purtătorilor de sarcină;) fenomenele de suprafață sunt nesemnificative;) procesele de generare sau recombinare a purtătorilor de sarcină neechilibrați nu au loc în joncțiunea pn;) recombinarea purtătorilor minoritari în volumul bazei este liniară, adică numărul de

purtători care se recombină pe unitatea de volum pe unitatea de timp este direct proporțional cu excesul Ecuații de concentrație diferențială: R Lrp Rp - Rpo r - Tr - Tr Principala pentru rezolvarea problemei este ecuația de continuitate, de exemplu, pentru găurile de la baza unei diode cu conductivitate electrică de tip n dib "=-+divJp - RP + Gp (,) Această ecuație arată cum și din ce motive se modifică concentrația găurilor în timp În primul rând, concentrația de găuri se poate modifica datorită existenței divergenței curentului găurii, care ia în considerare primul termen : În al doilea rând, concentrația găurilor se poate modifica datorită recombinării lor, care ia în considerare al doilea termen (Rp este rata de recombinare) Același termen, în funcție de semn, poate ține cont de modificarea concentrației de găuri din cauza generării termice În al treilea rând, concentrația găurilor se poate modifica din cauza generării non-termice (ionizare prin impact, ionizare sub acțiunea luminii etc) În acest caz GP = O Ținând cont de ipotezele făcute la începutul secțiunii, ecuația de continuitate ( ) rescriem astfel: alte dir Rp -Rpo (,) dg-rdh-'br Folosim ecuația ( ) pentru densitatea curentului de gaură, simplificând-o și ținând cont de ipotezele făcute: J D etc p - -q Pdx (,) După înlocuirea ( ) în ( ), avem Rp - Rpo ( ) ' tp adică, se obţine o ecuaţie cu diferenţă parţială de ordinul doi Pentru a o rezolva, sunt necesare condiții de limită și inițiale Condiții de frontieră La curenți scăzuti, concentrația purtătorilor de sarcină minoritari în baza de lângă joncțiunea pn este determinată de relația ( ): Pp(O) = Ppoexp k~ Înlocuind aici valoarea tensiunii ( ), obținem la x= Pp(O) = Ppoexp kqT (U + Umexpjwt) = qU) (pwt t) = Ppo(exp kT exp kTexp/ffi ( ) Argumentul celui de-al doilea exponent este mic Prin urmare, el poate fi extins într-o serie, limitându-se la cei doi primii termeni ai săi: expu ~ +y+ Apoi ( ), ținând cont de extinderea într-o serie, ia forma (o) qU + (qU)q(Jm t Rp = Rpoexp kt Rpo exp kt ;;t expJffi (,) Astfel, concentrația purtătorilor de sarcină minoritari în baza de lângă joncțiunea pn are o componentă constantă și o componentă variabilă Frecvența de schimbare a componentei variabile este aceeași cu frecvența tensiunii alternative aplicate Dacă tensiunea alternativă nu ar fi mică, atunci componenta variabilă a concentrației purtătorului ar avea armonici de ordin superior cu o frecvență care este un multiplu de ffi A doua condiție la limită rezultă din idealitatea tranziției ohmice, adică, adică pentru X = Wn Pn(Wn)=PnO ( ) Formular de soluție Pentru a transforma ecuația diferențială ( ), alegem forma soluției sub forma sumei componentelor constante și variabile ale concentrației, adică o formă similară cu forma condiției la limită (O) Acest lucru se datorează liniarității ecuației pentru concentrația purtătorilor de sarcină, astfel încât nu pot apărea noi armonici Atunci soluția ecuației diferențiale ( ) ar trebui să aibă forma Pp(x; t) = Ppo + Lp(x) + Pp(x)expjffit, ( ) unde Pn(x; t) este concentrația totală a purtătorilor de sarcină minori în bază; Lrp (x) este o componentă constantă a concentrației în exces de purtători minoritari, care depinde doar de coordonată; Pп(x)expjffit este o componentă variabilă a concentrației în exces a purtătorilor de sarcină minoritari, care depinde atât de coordonată, cât și de timp Astfel, componenta constantă din ( ) este reprezentată ca suma dintre concentrațiile de echilibru și excesul Transformarea ecuației diferențiale generale După înlocuirea formei alese de soluție ( ) în ( ), obținem R (x) J ■ f fieXpJ ffii \u d D q [Lr (x)] + D q r (x) expJ "ffit -π ρ qx p qx Lr (x) r (X) t expJffi (,) Tr Tr Această ecuație are termeni care depind și nu de timp Ecuația este valabilă numai dacă sumele algebrice ale

componentelor independente de timp și dependente de timp separat sunt egale cu zero Prin urmare, pentru componenta constantă a concentrației în exces, din ( ) obținem Unde Lp = uVtr Condiții limită pentru componenta constantă a concentrației în exces: pentru X = Rp(O) = Ppo(exp ~~ -), ( ) pentru X= Wn Lpp(Wn) = ( ) Pentru componenta variabilă a concentrației în exces d pn(X) Pp(X) (, ?) dT-LH, unde Ap = Lp yj + jW'Cp Scriem condițiile la limită pentru componenta variabilă a concentrației în exces pe baza condițiilor generale la limită ( ) și ( ) : pentru X = Pn( )expjffit = Pn(exp ~~)~~m expjffit, sau în final • ( ) (qU) qUm Rp -Rpo exp kt -,;t, ( ) pentru X = Wn Pn(Wn) = (,) Ecuațiile rezultate pentru componentele constante și variabile sunt similare, astfel încât doar una dintre ele poate fi rezolvată Soluția pentru componenta constantă a concentrației în exces de purtători minoritari în bază Soluția ecuației diferențiale ( ) poate fi căutată în mod convenabil în formă (,) Acest tip de soluție simplifică căutarea constantelor arbitrare, dacă sunt stabilite condiții pe granițe și, în același timp, pe o singură limită zero - zero Înlocuind x = în ( ) și ținând cont de condiția la limită ( ), obținem Lrp (O) \u d Rpo (exp k ~ -) \u d Al Ținând cont de condiția la limită ( ) și de valoarea constantei de integrare Al la x = Wn Apn(Wn) = =Ppo(exp k~ -)ch ~P · + A sh Prin urmare, A \u d -Ppo (exp k ~ -)cth Înlocuind în ( ) valorile constantelor de integrare, obținem în final Lrp(x) = Ppo(exp k~ -) (ch ~P -cih sh ~) ( ) Aceasta este distribuția componentei constante a concentrației în exces a purtătorilor de sarcină minoritari în baza diodei la tensiuni diferite § CALCULUL CONSTANTELOR CURENȚI care trec prin diodă ȘI INJECȚIA AFERATĂ ȘI EXTRACȚIA PORTATORULUI ÎNCĂRCA Pentru a determina componenta găurii a densității de curent într-o secțiune arbitrară a bazei diodei, folosim relațiile ( ) și ( ) După diferențiere, obținem / p(x) = -qDppno (sh ~-cth w ch ~)(exp qU -i-) (,) Lp Lp Lp Lp kT Aceasta este densitatea curentului continuu în diferite părți ale bazei diodei La x = , adică la limita bazei cu o joncțiune pn, componenta găurii a densității curentului prin joncțiune ( )= qDpPno cth w (exp qU -) (,) P Lp Lp kT În mod similar, puteți scrie componenta electronică a densității curentului prin joncțiunea diodei, adică prin granița dintre regiunea p și joncțiunea p-n: (,) Pentru practică, cunoașterea densității totale de curent, adică suma componentelor electronului și a găurilor, prezintă un interes mai mare Este necesar să se însumeze densitățile de curent într-una și aceeași "secțiune Ke-niG" Totuși, calcularea curentului purtătorilor de sarcină principali în stare de rau ar necesita utilizarea unei tehnici diferite în comparație cu metoda de calcul a curentului purtătorilor minoritari Prin urmare, folosim presupunerea că procesele de generare și recombinare a purtătorilor nu au loc în joncțiunea pn În consecință, componentele densităților de curent (electron și gaură) sunt aceleași pe ambele părți ale tranziției Acum puteți determina densitățile de curent ale purtătorilor de sarcină minoritari de pe ambele părți ale joncțiunii pn și să le adăugați: = c(O)+ p(O') = q(PnoDp cth w + npoDn cth Wp) X Lp Lp Ln Ln (,) Valoarea celui de-al doilea factor din ( ) este determinată de parametrii regiunilor semiconductoare de pe ambele părți ale joncțiunii pn și de grosimea acestor regiuni Produsul primilor doi factori, care este independent de tensiune, se numește densitate de curent de saturație: (PnoDp th Wn + npoDn th Wp) J noi-q C C (,) Lp Lp Ln Ln Strict vorbind, acest curent nu este complet și nu este întotdeauna saturat, deoarece grosimea bazei diodei depinde de tensiune datorită modificării grosimii joncțiunii p-n cu o modificare a tensiunii

aplicate Astfel, CVC-ul unei diode este de obicei scris ca j = /us (exp ~~ - } ( ) Reprezentarea grafică a CVC este prezentată în fig Pentru comoditate, scalele tensiunilor directe și inverse, precum și curenții continui și inversi, sunt alese diferite § CAZURI SPECIALE DE CALCUL A DISTRIBUȚIEI PORTATORILOR MINORITARI ȘI CURENTUL DE SATURAȚIE Pentru a obține expresii și mai simple și pentru a înțelege mai bine semnificația rezultatului, luăm în considerare cazurile speciale limitative ale diodelor cu o bază groasă și subțire O diodă cu bază groasă este o diodă a cărei grosime a bazei este mult mai mare decât lungimea de difuzie a purtătorilor minoritari purtători de sarcină (Wn ~ Lp) · Pentru o altă regiune a diodei, datorită dopajului său puternic, această inegalitate este cu atât mai adevărată, adică de ex Wp~Ln Atunci argumentele cotangentelor hiperbolice din relația ( ) depășesc semnificativ unitatea, iar cotangentele hiperbolice în sine sunt apropiate de unitate: cth ~ și cth ~ Folosind formulele Euler (shy=ev-;eY chy = eУ + e-y) = , din relația ( ) obținem distribuția excesului concentrație exactă a purtătorilor de sarcină minoritari în baza unei diode cu bază groasă: Lrp(x) = Ppo(exp ~~ -)exp(-: P} Pn (,) Prin urmare, într-o diodă cu bază groasă, valoarea absolută a concentrației în exces a purtătorilor minoritari în bază (Lrp = Rp-Rpo) scade exponențial odată cu creșterea distanta de la jonctiunea pn (Fig) Pentru tensiunile directe, concentrația în exces este pozitivă, ceea ce corespunde injectării purtătorilor minoritari centrați pe purtători minoritari în bază Cu tensiuni de încărcare inversă în baza diodei cu nii, concentrația în exces a bazei negative la diferite valori este, adică Rp , V, nu se modifică cu tensiunea (Fig) Aceeași concluzie poate fi trasă dacă ne imaginăm distribuția purtătorilor minoritari în baza unei diode cu o bază groasă la tensiuni inverse diferite (Fig) Cu o creștere a tensiunii inverse în valoare absolută și, în consecință, cu o creștere a grosimii joncțiunii pn kT lUoopJ"q o z Distribuția concentrației minore de purtători celule de încărcare de la baza diodei Tensiuni inverse la diferite tensiuni inverse ale DIODELOR cu o bază groasă și îngustă, explicându-se printr-o bază nesubțire atunci când se ține cont de ex-menozitatea curentului invers (tracțiunea curentă a purtătorului minor de saturație) în dioda din celulele de încărcare de la baza groasă adiacentă la extracție Zonele purtătorilor minoritari din apropierea joncțiunii pn datorită grosimii bazei deplasează curbele de distribuție a concentrației purtătorilor de sarcină minoritare în adâncimea bazei la un gradient de concentrație constant în apropierea joncțiunii pn, care, conform relaţiei ( ), corespunde unui curent constant Expresia ( ) este similară expresiei ( ), obținută din considerații pur fizice, deoarece L = y'D În conformitate cu ( ), lungimea caracteristică care determină proprietățile și mulți parametri ai unei diode cu o bază groasă este lungimea de difuzie a purtătorilor de sarcină minori în baza diodei O diodă cu bază subțire este o diodă a cărei grosime a bazei este mult mai mică decât lungimea de difuzie a purtătorilor de sarcină minoritari (Wn " Lp) În acest caz, argumentele tuturor funcțiilor hiperbolice din relația ( ) vor fi mici (mai puțin de unul) Prin urmare, atunci când extindem funcții hiperbolice într-o serie, ne putem restrânge la un singur termen de expansiune (cthy ~ \jy ; shy ~ y; chy ~) Apoi, pentru distribuția concentrației purtătorilor minoritari într-o diodă cu bază subțire, din ( ) se obține (,) Prin urmare, într-o diodă cu o bază subțire, concentrația purtătorilor minoritari de sarcină scade liniar cu distanța de la joncțiunea pn (Fig) Cu alte cuvinte, de exemplu, pentru o diodă cu o joncțiune p + -n asimetrică, densitatea de curent

în orice secțiune transversală a bazei este neschimbată în conformitate cu ( ) și ținând cont de ( ), adică recombinarea lui purtători de încărcare minori în bază este nesemnificativ Toți purtătorii de sarcină minoritari injectați în bază la o tensiune directă ajung la joncțiunea ohmică, unde se recombină Cu o tensiune inversă, toți purtătorii de sarcină alimentați la bază printr-un contact neredresator sunt extrași prin joncțiunea pn a unei diode cu o bază subțire Densitatea curentului de saturație într-o diodă cu bază subțire din relația generală ( ) ținând cont de extinderea într-o serie de funcții hiperbolice ÍHac=q(PnoDp + npoD") ( ) Wn Wr Această expresie pentru densitatea curentului de saturație poate fi obținută și pe baza faptului că curentul invers se datorează doar difuzării purtătorilor de sarcină minoritari de la joncțiunile ohmice la joncțiunea pn de-a lungul regiunilor adiacente joncțiunii Prin urmare, pentru a calcula densitatea curent de saturație, este necesar să se utilizeze termenii doi din ( ) și Fig Distribuție contra centrarea transportatorilor minori ( ) sau relațiile ( ) celule de încărcare din baza diodei cu și ( ) În acest caz, gradienții con- bază subțire la diferite concentrațiile de transportatori minoritari în învârtire Pot fi definite zone π și p ca Pno/Wn și npo/Wp (Figura) Astfel, într-o diodă cu o bază subțire, densitatea curentului de saturație depinde de tensiunea inversă, deoarece cu o modificare a tensiunii inverse rlo Grosimea bazei (Wn sau Wp) se modifică și datorită modificării grosimii joncțiunii pn (vezi Fig) Aceeași concluzie se poate trage dacă prezentăm distribuția non-bazelor de purtători de sarcină în baza unei diode cu bază subțire la diferite tensiuni inverse (Fig) Cu mărire-Fig O Distribuția tensiunii inverse peste abso-centrarea purtătorilor minori celule de încărcare de la baza diodei valoarea fluent se schimbă la tensiuni inverse diferite gradientul de concentrație nu este zheniya, explicând creșterea purtători primari de sarcină în bază, adică valoarea curentului invers în joncțiunea diohmică (sursa este neos-de cu o bază subțire de purtători de sarcină primară în acest caz), cu atât este mai puternic efectul asupra curentului invers, cu atât este mai aproape pana la jonctiunea pn În conformitate cu ( ), lungimea caracteristică care determină proprietățile și mulți parametri ai unei diode cu o bază subțire este grosimea bazei diodei § CALCULUL VARIABILLOR CURENȚII ȘI MIEZUL NOPȚII CONDUCTIVITATEA DIODEI În legătură cu analogia ecuațiilor diferențiale pentru distribuția componentelor constante și variabile ale concentrației purtătorilor minoritari ( ) și ( ), precum și în legătură cu analogia condițiilor la limită ( ) și ( ), ( ) și ( ) puteți scrie imediat o expresie pentru componenta variabilă a densității curentului prin diodă Pentru a face acest lucru, este suficient să faceți următoarele înlocuiri: în loc de L, înlocuiți A=L; (,) yl+jwT (qU) (qU)q(J" în loc de exp-; ;t-substitut expkt ;;τ· Ca rezultat, obținem o expresie pentru componenta variabilă a densității curentului, similară cu expresia ( ): · ! q IT (PnoDp th W + npoDn th Wp) qU (,) m-kT Ap c Ap A c A exp kT Se poate observa că componenta variabilă a densității de curent prin diodă este liniar legată de tensiunea alternativă dacă această tensiune este mică (vezi §) Rezultă că pentru a descrie proprietățile diodei, este recomandabil să se folosească tehnica obișnuită de inginerie electrică - pentru a introduce conductivitatea totală (sau impedanța) diodei pentru curent alternativ: Atunci pentru diodă, folosind ( ), putem scrie y = q S (PnoDp th W + npoDn th Wp) qU (,) kT Ap c Ap A c A exp kT Expresia rezultată vă permite să calculați conductivitatea unei diode semiconductoare la orice frecvență și pentru orice raport între

dimensiunile diodei și lungimea difuziei După cum se poate observa din ( ), conductivitatea diodei pentru curent alternativ se dovedește a fi complexă Scriem conductivitatea diodei la fel de • Y -m^Sdif, G care corespunde unui circuit echivalent paralel Valorile capacității de difuziune Cdif și ale rezistenței diferențiale r pot fi calculate pentru orice caz din expresia generală a conductivității totale a diodei ( ) prin transformări adecvate (extragerea rădăcinilor din numere complexe, luând cotangente hiperbolice a sumelor, etc) Cu toate acestea, expresiile rezultate se dovedesc a fi destul de complexe, așa că este indicat să ne limităm la cazuri speciale Există patru astfel de cazuri speciale - două rapoarte de dimensiune (W:: "L" și W ":L) pentru două game de frecvență (sus si jos)) W ~L, frecvențe joase Condiția W::"L înseamnă că argumentele cotangentelor hiperbolice din ( ) sunt mari Prin urmare, cth{~ y' + jwT)~ Acum rămâne de transformat relația ( ) Transformarea acestei relații se dovedește a fi simplă dacă wt ":: Vom considera o astfel de condiție drept un criteriu de joasă frecvență Apoi, extinzându-se într-o serie binomială y' + j wt, obținem JJ(+ - WT)J+ T l~t - -=t IwH Înlocuind această expresie în formula conductivității totale ( ), după gruparea termenilor, obținem y q S [(PnoDp + npoDn)+ jw (L + L)] qU ( ) ;;t -t; -t;: -P P πρo π expk'T Prin urmare, ! q S (PnoDp + npoDn) qU r -kT Lp L exp kT ' sau (,) qS dU -;=kg!nasehrkg Folosind expresia ( ) pentru BAH, scriem ajungem in sfarsit +-=kqT (/ +knas) (,) După cum se poate observa din ( ), capacitatea de difuzie cdif = q S kT (qUPnoLp + npoLn)exp -;;τ ( ) Dacă Ppo ~ pro, sau pro ~ Ppo, sau T: p = T: p = m:, atunci expresia pentru capacitatea de difuzie, ținând cont de ( ) și ( ) sau ( ), se reduce la forma qS(qU) SdiF - kT Inas exp ;;g-t:, sau luând în considerare ( ) Cdkf = :т (/ + iнас) T: (,) Pentru diode cu o joncțiune pn asimetrică t: în această formulă, durata de viață a purtătorilor minoritari într-o regiune ușor dopată, adică în baza diodei Pentru o astfel de valoare a capacității de difuzie, se poate găsi cu ușurință constanta de timp: gSdif \u d m: / (,)) W~L, frecvențe înalte Criteriul de frecvență înaltă ut : ~ , adică încălcarea condiției de frecvență joasă în care, ca mai devreme, cth{ ~ y' + jroT:) ~ Acum trebuie să transformăm ( ) ținând cont de frecvența înaltă Pentru a extrage rădăcina, este convenabil să folosim condiția obținut: ~ Apoi, aplicând formula De Moivre, obținem y' +jroT: ~ y'jroT: = y'cos ° + jroT:sin ° = y' ut:(cos ° + j sin S) = y'ut: (j -~) v v t e ~ "~ + j "~ e L J' -L J' - Prin urmare, conductivitatea totală a diodei y \u d q S [G + ° (PnoDp D + npoDn VT:) + kT Lp L + g; ; ; (PnoDp ~+ npoDn ~)] gU J v Lp L exp kT (,) Apoi = q S r;;; (PnoDp Um;-+ npoDn R)e qU Ï) r kT JI Lp L xp kT Daca Rpo ~ pro fie despre ~ Rpo, fie T: p \u d T: n \u d t:, apoi expresia conductivității active qS ~ ! qU -,-= kT V nasehr brad T e += kqT (/ +inas) (,) Comparând ( ) și ( ), obținem (,) În mod similar, comparând părțile imaginare ( ) și ( ), avem (,) Constanta de timp în acest caz gSdiF= /w (,) confirmă că defazarea dintre curent și tensiune este de l/ Același lucru se poate concluziona din egalitatea părților reale și imaginare ale conductivității totale a diodei ( ), adică ep \u d arctan ~ \u d arctan \u d ° G) W T Ibr aceiași transportatori incluse în tranziție În legătură cu ipoteza egalității coeficienților de ionizare de impact se obține automat egalitatea coeficienților de multiplicare a avalanșei: Mn=Mp=M În cele din urmă, parametrul diodei care caracterizează fenomenul de defalcare a joncțiunii sale de redresare este tensiunea de rupere a diodei - tensiunea la care are loc o creștere nelimitată a curentului (Fig) Formal, la tensiunea de avarie

M - + oo În condiții de producție, tensiunea de defalcare a unei diode este determinată de valoarea tensiunii inverse care provoacă defectarea joncțiunii de redresare, la care curentul invers atinge o valoare predeterminată Coeficientul de relație multiplicarea avalanșei cu coeficient de ionizare de impact și derivarea stării de defalcare a avalanșei De obicei, o joncțiune pn este folosită ca joncțiune de redresare în diferite diode Prin urmare, vom lua în considerare în continuare defalcarea avalanșei pentru joncțiunea p-n Pentru a calcula conexiunea parametru care caracterizează procesul fizic - coeficientul de ionizare de impact - cu parametrul care caracterizează tranziția p-n în timpul ionizării de impact - coeficientul de multiplicare a avalanșei - folosim ecuația de continuitate, de exemplu, pentru electroni, care are o formă similară cu ecuația de continuitate pentru găuri (,): dp = ! divln-Rn+Gn db q (,) Dacă, când luăm în considerare procesul constant de ionizare prin impact (dp / db = O), neglijăm recombinarea în joncțiunea p-n la o tensiune inversă mare pe diodă (Rn = O), atunci ecuația de continuitate pentru modelul unidimensional al dioda va lua ~ id (,) În acest caz, rata de generare netermică a electronilor (Gn) ia în considerare generarea lor sub acțiunea unui câmp electric puternic Rata de generare non-termică este numeric egală cu E numărul de purtători formați pe unitatea de timp pe unitatea de volum Pentru a exprima rata energiei non-termice în termeni de coeficienți de ionizare de impact, luați în considerare un volum unitar având o lungime în direcția de trecere a purtătorilor de sarcină și o suprafață a secțiunii transversale egală cu unitatea Apoi fiecare purtător care trece prin acest volum formează un număr de purtători într-o unitate de volum egală cu coeficientul de ionizare a Numărul de purtători egal cu J/q trece prin volumul considerat pe unitatea de timp Prin urmare, dacă luăm în considerare generarea de electroni (sau găuri) ca urmare a ionizării atomilor de către electroni și găuri, obținem (,) Inlocuim ( ) in ( ) Apoi =a(Jn+lp)=al (,) Pentru a rezolva ecuația diferențială ( ), aflăm condițiile la limită Pentru o tranziție p-n asimetrică (de exemplu, p + -p), putem presupune că doar fluxul intră în tranziție electroni corespunzători densității de curent electronic Jn( ) (Fig) În conformitate cu definiția coeficientului la- propagarea vinului, densitatea de curent electronic care părăsește tranziția este MJn( ) Aceeași densitate de curent este densitatea totală de curent prin joncțiunea luată în considerare, deoarece componenta de gaură a curentului nu trece prin limita stângă a joncțiunii n+-p asimetrice Astfel, condiţiile la limită iau forma pentru x' n( )=M n(b)= ; p= p(O)=O; (,) pentru X' b n= n(b); p= p(b) Ținând cont de raționamentul de mai sus, ecuația ( ) ia forma -~x~ =ay! p(b), sau -dln=aMln(b)dx: (,) La integrarea ecuației diferențiale ( ) este necesar să se convină asupra limitelor integrării folosind condiţiile la limită ( ) , care sunt prezentate clar în fig Apoi Min( ) Despre -S din = MJn (b) Sadx η sau despre -Min(b) + p(b) = Min(b)Sadx Ca urmare -~= Sadx (,) O Relația ( ) reflectă relația dintre coeficientul de multiplicare a avalanșei și coeficientul de ionizare de impact În timpul ruperii joncțiunii pn, coeficientul de înmulțire a avalanșei este M - + oo Apoi adx = (,) O Ecuația ( ) este condiția pentru defalcarea de avalanșă a tranziției p-n Calculul coeficientului Înmulțirea avalanșei și tensiunea de defalcare în timpul defalcării prin avalanșă a unei tranziții ascuțite electron-gaură Distribuția intensității câmpului electric într-o joncțiune asimetrică n + -p ascuțită este liniară ( ), iar aproape întreaga regiune de încărcare a spațiului este situată în zona ușor dopată regiunea semiconductorului (

) Apoi în conformitate cu ( ) ținând cont de modificarea originii acceptate (b ~ br) IEI = qNae (b - x) Ținând cont de relația dintre coeficienții de multiplicare a avalanșei și ionizarea la impact ( ) și acceptând aproximarea dependenței coeficientului de ionizare de impact de intensitatea câmpului electric ( ), obținem b k-= ~ adx = A{ q~:e y~ (b -x)m dx = (qNa)t llm+ =A :JE (,) m+I Să substituim în ultima expresie relația pentru grosimea unei joncțiuni p-n nesimetrice ascuțite ( ), în care valoarea diferenței de potențial de contact poate fi neglijată în comparație cu tensiunea inversă (SL>can ~ UI) Atunci m+ m+ \ = A (qNae)m(o)- -IUI (,)M m + qNap Folosind această relație, se poate calcula factorul de multiplicare a avalanșei, cunoscând concentrația de impurități în baza diodei și alți parametri ai materialului de bază În timpul unei defecțiuni de avalanșă (la Iprab), factorul de multiplicare a avalanșei este M-+ oo Prin urmare, m+ w+ = A (qNap)t( ) U ( ) m+ q Probe Nap Împărțind ( ) la ( ), obținem - / M \u d (U / Iprob) adică M= - t + -(//Unpo) sau M= - (,) -(U/Unpo)b ' unde b \u d (m +) / este un coeficient care este diferit pentru diodele din diferite materiale (b \u d) Când I - + (M - + !, când I - + Iprob M - + oo (Fig) Din expresia ( ) tensiunea de avarie în timpul defectării avalanșei + m+I m+I Unp: \u d ~ s- -) (Eeo) "' - - (- g '-) t - - A q L",, sau t- Și -[(m+)~(ei-:o)~J prob - -A -qT- (,) Nar"' + i Aici, expresia dintre paranteze pătrate include doar cantități care pot fi considerate constante pentru un anumit material Apoi, introducând o nouă notație, obținem Iprob = , (,) unde N este concentrația de impurități în regiunea slab dopată, adică în baza diodei; k \u d (t -) / (t + !) Experimentele confirmă -= purtare (,) În sistemul de coordonate d Iprob din d N experimental punctele se află pe o linie dreaptă (Fig , a) În același timp, pentru p-n-tranziții asimetrice p + - p și p + - p Orez Dependența coeficienților formați în aceeași agent de reproducere a avalanșelor dependenta de tensiunea de pe semiconductor, dependente d Iprob = joncțiunea pn = f(Ig N) potrivire Acest fapt experimental demonstrează validitatea ipotezei de egalitate a coeficientului ionizare de impact pentru electroni și găuri, care a fost acceptată la începutul acestei secțiuni Cu toate acestea, cel mai adesea nu se cunoaște concentrația de impurități în baza diodei, ci rezistivitatea acesteia, adică rezistivitatea semiconductorului original De aceea; ținând cont de relația dintre concentrația de impurități sau concentrația purtătorilor majoritari și rezistivitate, relația ( ) este mai convenabil să scrieți la fel de Ilrob = BQa ( ) Pentru joncțiuni p+-p de siliciu Ilrob = Q - ; n+-p-tranziţii Iprob = Q , pentru joncțiuni p+n germaniu Iprob = Q ; n+-p-tranziții Iprob = Q , unde Q este rezistivitatea de bază, Ohm-cm UnpoH,V J, + -+ t tensiunea de avarie Valoarea acestui critic electric-Fig Caracteristica I-V a diodei la câmpul electric este aproximativ defalcarea tunelului pentru diferite V/CM pentru tranziții cremoase temperaturile și V/cm pentru germaniu Deoarece probabilitatea tunelului depinde foarte mult de tensiune a câmpului electric, atunci efectul de tunel extern προ-este ca o defalcare a diodei (Fig) Să luăm în considerare, ca exemplu, calculul tensiunii de ruptură în timpul ruperii tunelului a unei joncțiuni pn ascuțite apropiate de simetrice Cea mai mare valoare a rezistenței ferăstrăului electric într-o astfel de tranziție există la contactul metalurgic [vezi § și, în special, formula ( )], adică pentru x = IEI max = q Nap br eeo Folosind ecuația ( ), obținem lE/max = qNap N NqnN b eeo ap+ dp Ținând cont de relația ( ) pentru grosimea unei tranziții pn ascuțite, obținem E q NapNfln max - NN (CJJkoh -U) eeo ap+ dp La Emax = Ecr, tensiunea la joncțiunea pn va

fi defectată Prin urmare, eooE~p Nap + Idp și prob - q NapNfln -qjKOH sau eeoE~p (+) (,) Unpo = q Nap Idp -qjKOH · În consecință, în timpul defecțiunii tunelului, tensiunea de defalcare se dovedește a fi invers proporțională cu concentrația de impurități de gradul întâi Defalcarea tunelului poate apărea numai în joncțiunile pn realizate în semiconductori cu o concentrație mare de impurități, deoarece tunelul necesită o grosime mică de barieră potențială și, în consecință, o lățime mică de joncțiune Cu o lățime mică de tranziție, tensiunile sale de defalcare se dovedesc, de asemenea, mici Prin urmare, diferența de potențial de contact în expresie ( ) nu trebuie neglijată, deoarece poate fi comparabilă cu tensiunea de rupere Dacă în ( ) trecem de la concentrațiile de impurități la rezistențe specifice și totuși neglijăm diferența de potențial de contact, atunci obținem relația binecunoscută (,) Pentru joncțiunile de siliciu pn, după înlocuirea valorilor numerice ale parametrilor, tensiunea de rupere în timpul defecțiunii tunelului Iprob = Qn + Qp; pentru tranzițiile germaniului Iprob = Qn + Qp, unde Qn și Qp sunt rezistențele specifice ale p Tunne b- a nny p- și p-ariile adiacente modificării nupuu nu, du-te, ohm-cm Cu o creștere a temperaturii în durere-Fig Dependenta pro Pentru majoritatea semiconductorilor, lățimea tensiunii de antrenare la banda tun-gap scade Urmărire și avalanșă important, în același timp, scade și grosimea rezistenței specifice, lățimea barierei de potențial la acel baza diodei este aceeași intensitate a câmpului electric ceea ce duce la o creştere a probabilităţii tunelului purtătorului prin bariera potenţială Prin urmare, tensiunea de ruptură în timpul ruperii tunelului scade odată cu creșterea temperaturii (Fig) Deoarece defalcarea tunelului necesită o grosime mică a joncțiunii p-n, se observă în diodele realizate pe bază de semiconductori cu o concentrație mare de impurități Prin urmare, tensiunile de avarie din tunel nu depășesc câțiva volți La diodele realizate din semiconductori cu o concentrație mai mică de impurități și, deci, cu o grosime mai mare a tranziției p-n, defalcarea se va produce la tensiuni înalte și va avea caracter de avalanșă (Fig) § TEPYAOVO I PRO I Volt-amper caracteristică ținând cont de disiparea căldurii în diodă Defalcarea termică a unei diode este o defecțiune, a cărei dezvoltare se datorează eliberării de căldură în joncțiunea electrică de redresare datorită trecerii curentului prin joncțiune Când se aplică o tensiune inversă diodei, aproape toată aceasta cade pe joncțiunea pn, prin care curge curentul invers, deși mic Puterea eliberată la joncțiunea p-n Pvyd \u d Iobr / arr ( ) provoacă încălzirea joncțiunii p-n și a zonelor semiconductorului adiacente acesteia Puterea eliminată din joncțiunea p-n ca urmare a conducției termice și a disipării ulterioare a căldurii în mediul înconjurător este proporțională cu supraîncălzirea joncțiunii p-n (T -Tacr) și invers proporțională cu rezistența termică a designului diodei Rt ps: p T-Tacr Uoop Unpo /~po O (?) otv -itps + - -Ius Astfel, rezistența termică ~ac Distanța diodei dintre joncțiunea pn și mediu este determinată de puterea disipată de la joncțiune către mediu la o diferență de temperatură între ele de un kelvin La ceva timp după ce tensiunea inversă este aplicată diodei, volumul degajării de căldură în tranziția p-n este stabilit la rate diferite între căldura generată și îndepărtată de căldura mediului Cu ACEST Rvyd \u d Rot , SAU U / T -Tokr arr arr \u d Rt ps (,) Să luăm acum în considerare dependența curentului invers de temperatură Pentru cel mai simplu caz, când curentul invers este determinat de extragerea purtătorilor minoritari într-o diodă de bază groasă [cm ( ) sau ( )], Dob \u d DnasZ \u d qSn'ff-NLp + -NLn) '\ dptr arTp Ținând cont de ( ), neglijând

dependența slabă de tempo concentrația de impurități, lungimea difuziei și durata de viață, obținem (,) unde /oo are sensul formal al curentului la un infinit de mare temperatura Să substituim ( ) în ecuația de echilibru termic ( ) Apoi T-Tacr LE Și (,) arr -Itpsioo exp""'kf" Relația rezultată arată relația dintre tensiunea inversă de pe diodă și temperatura joncțiunii pn Rapoarte ( ) și ( ) sunt un sistem de două ecuații pentru ramura inversă a BAC-ului diodei, exprimate în formă parametrică, prin parametrul T, adică ținând cont de degajarea de căldură în joncțiunea pn Vederea generală a unei astfel de curbe este prezentată în Fig Curba nu pleacă de la origine, deoarece curentul invers a fost luat egal cu curentul de saturație, adică nu ne-a interesat partea inițială a caracteristicii Pot exista două extreme pe curbă: tensiunea maximă și minimă Între aceste extreme există o secțiune BAC cu o rezistență diferențială negativă Posibilitatea existenței unei rezistențe diferențiale negative se explică prin faptul că odată cu creșterea valorii alocate putere, temperatura crește și, în consecință, curentul și puterea de ieșire cresc Astfel, în diodă are loc un feedback pozitiv intern, care poate duce la apariția defectării termice și a rezistenței diferențiale negative Să studiem BAC extrema Pentru a face acest lucru, este necesar să diferențiem ecuația ( ) în funcție de temperatură și să echivalăm expresia rezultată la zero: bIobr [LE dT -Rt ps Prea exp kT + +(T -Tacr) (exp ~;) l: (-*)] = , sau le le t k-T + -k-Tacr = Prin urmare, temperatura joncțiunii pn a diodei, corespunzătoare tensiunilor extreme de pe diodă, T = + y(~:) -l: Tacr (,) Dioda va avea o rezistență diferențială negativă atunci când este pornită din nou, iar ramura inversă a BAC va avea două tensiuni extreme, cu condiția ca rădăcinile ultimei ecuații să fie reale și diferite, adică dacă (le) le k > -k-Tocr, sau LE> kTop ( ) Ultima inegalitate este valabilă pentru toți semiconductorii kov utilizat pentru fabricarea diodelor semiconductoare Calculul tensiunii de avarie în timpul defecțiunii termice Pentru a evalua efectul încălzirii asupra curentului invers al diodei, introducem conceptul de coeficient de temperatură al curentului invers (prin analogie cu alți coeficienți de temperatură - TKr, TKR, TKe etc): dl a=TKl=-l df" (,) Să substituim în ( ) aproximarea curentului invers ( ) Apoi loo [exp(-*)] LE LE a \u d - - - - - - kT (,) = w fooexp(-:/) În ecuația diferențială ( ), puteți separa variabilele și apoi realizați integrarea, căzând limitele integrării: t Sd/=a~b /mediu Tokr unde /env este curentul invers prin diodă la temperatura inițială Tacr La integrare, neglijăm dependența de temperatură a lui a, scoțând acest parametru din semnul i-integralei În acest caz, rezultatul final poate fi considerat valabil în prima aproximare doar pentru o mică supraîncălzire a joncțiunii p-n în raport cu mediul care înconjoară dioda Apoi, ca rezultat al integrării, obținem a (T -Tacr) \u d Ip- -, înv sau / exp [a(T -Tocr)) = íoκρ' adică / = foKpeXp [a(T -Tocr)) (,) Dacă acum înlocuim expresia curentului invers prin coeficientul de temperatură al acestui curent ( ) în ecuația de echilibru termic ( ), atunci U = T -Tacr ( ) Rt psiokrekhr [a(T-Tacr)] Cu defalcare termică, dUjdT = Prin urmare, după diferențierea formulei ( ) și reducerile pe care le obținem -a (T -Tacr) \u d De aici temperatura joncțiunii p-n în timpul defecțiunii termice t \u d T mediu + / a (,) Pentru diodele semiconductoare, valoarea coeficientului de temperatură a curentului invers este de obicei de aproximativ , k-l, adică, în timpul defecțiunii termice, temperatura joncțiunii pn depășește temperatura ambiantă cu doar aproximativ K Și anume datorita supraincalzirii mici a jonctiunii pn la inceputul dezvoltarii termice defalcare, putem

considera coeficientul de temperatură al curentului invers ca o valoare constantă cu o modificare a temperaturii și îl putem scoate din semnul integral Desigur, odată cu dezvoltarea defalcării termice cu o creștere suplimentară în sens invers curent, temperatura joncțiunii p-n poate crește semnificativ - până la topirea materialului conductor pL Folosind valoarea obținută a temperaturii joncțiunii pn în timpul defecțiunii termice ( ) și înlocuind-o în ( ), primim Unpo = (,) a Itpsiocre În consecință, tensiunea de defalcare în timpul defecțiunii termice a unei diode este determinată de curentul invers, coeficientul de temperatură al curentului invers și rezistența termică O atenție deosebită trebuie acordată dependenței puternice a tensiunii de defecțiune termică de temperatura ambiantă Odată cu creșterea temperaturii ambiante, tensiunea de avarie în timpul defecțiunii termice în conformitate cu ( ) și ( ) scade (Fig) Tensiunea de rupere scade, în primul rând, datorită creșterii puterii degajate la aceleași tensiuni inverse și, în al doilea rând, datorită deteriorării eliminării căldurii din joncțiunea pn Deoarece tensiunea de defalcare în timpul defecțiunii termice depinde de curentul invers prin diodă la temperatura ambiantă, atunci în diodele cu curenți inversi mari, chiar și la temperatura camerei, se creează condiții pentru defecțiunea termică și are loc mai devreme decât defectarea avalanșelor Acest lucru este valabil, în special, pentru diodele cu germaniu Dimpotrivă, în diodele de siliciu, datorită curenților inversi mult mai mici, tensiunea de defalcare termică este atât de mare încât defectarea avalanșelor are loc mai devreme Cu toate acestea, acest lucru nu înseamnă că defalcarea termică nu poate avea loc în diodele de siliciu Poate apărea la temperaturi ambientale ridicate În plus, defecțiunea poate începe ca o avalanșă și apoi, pe măsură ce curentul invers crește, se transformă într-unul termic Datorită faptului că tensiunea de rupere în timpul defecțiunii termice scade odată cu creșterea rezistenței termice, trebuie acordată o atenție deosebită perfecțiunii designului diodei în ceea ce privește reducerea rezistenței sale termice De asemenea, trebuie remarcat faptul că rezistența termică poate crește din cauza instalării necorespunzătoare a diodei atunci când este izolată termic În acest caz , tensiunea de defecțiune termică poate fi redusă semnificativ Același lucru se poate întâmpla atunci când condițiile din mediu se schimbă (de exemplu, când presiunea aerului scade din cauza ascensiunii la o înălțime mare) Caracteristici de defalcare termică în diode reale Defalcarea termică a diodelor reale are loc întotdeauna odată cu formarea unui așa-numit "cord" sau canal de conductivitate ridicată, a cărui temperatură depășește temperatura medie a restului joncțiunii p-n La rândul său, formarea unui filament poate fi cauzată fie de defecte într-o joncțiune pn reală, fie de o fluctuație statistică a densității de curent invers asupra zonei joncțiunii pn Într-adevăr, dacă la un moment dat în joncțiunea p-n, la un moment dat, densitatea curentului invers s-a dovedit a fi ceva mai mare decât densitatea curentului invers în restul joncțiunii p-n, atunci temperatura acestui loc al joncțiunii p-n va fi mai mare cu cât puterea specifică eliberată acolo este mai mare O creștere a temperaturii duce la o creștere a densității de curent invers la o anumită locație a joncțiunii pn datorită creșterii generării termice a purtătorilor fie în joncțiunea în sine (vezi § O), fie în regiunile adiacente semiconductorului la tranziția p-n (vezi § , și) O creștere locală a densității de curent va determina o creștere locală a temperaturii, o creștere a temperaturii va determina o creștere a densității de curent etc d Diametrul filamentului rezultat din

defalcarea termică poate fi de doar câțiva micrometri Lungimea lui determină Xia grosime p-p-joncțiune, adică poate fi de zeci de micrometri Prin urmare, ținând cont de volumul mic al filamentului, ar trebui să se concluzioneze că, pentru dezvoltarea defalcării termice în diodele reale în timpul împingerii curentului, este necesară o putere foarte mică, adică defalcarea termică poate apărea la curenți inversi mici și tensiuni inverse scăzute Puterea specifică eliberată într-un volum unitar al cablului, chiar și la curenți inversați foarte mici prin diodă, se dovedește a fi destul de mare Conform ( ), filamentul trebuie supraîncălzit cu aproximativ K pentru apariția defecțiunii termice Acest lucru indică, în primul rând, că este necesară din nou o putere scăzută pentru dezvoltarea defecțiunii termice și, în al doilea rând, defalcarea termică este reversibilă fenomen, dacă, desigur, curentul invers în timpul defecțiunii este limitat, fără a aduce încălzirea cablului la apariția unor procese fizice și chimice ireversibile în semiconductor Orez CVC la pro- Caracteristicile I-V ale cablului ( ) și o diodă de luptă și o hiperbolă egală cu puterea de rezistență la șunt a restului joncțiunii p-n ( ), care în total poate da o caracteristică I-V în formă de Y a diodei ( ) în timpul defecțiunii termice O consecință a volumului mic al cablului, de-a lungul căruia are loc defalcarea termică, este și inerția mică a procesului de defalcare termică a diodelor reale Constantele de timp termice pentru încălzirea şi răcirea cablului pot fi de ordinul lo- - lO-l s În același timp, trebuie să se țină cont de faptul că, în timpul defecțiunii termice, tensiunea pe diodă scade și capacitatea de barieră a joncțiunii p-n a diodei este descărcată prin rezistența cablului cu eliberarea de putere suplimentară în cordon Acest fenomen ajută la accelerarea încălzirii cablului și la reducerea inerției procesului de defalcare termică O altă consecință a ciupirii curentului în timpul defectării termice a diodei este posibilitatea obținerii unui fel de BAC - așa-numitul BAC în formă de y, care la prima vedere contrazice mecanismul de defalcare termică a diodei Într-adevăr, odată cu creșterea curentului prin diodă, temperatura joncțiunii pn ar trebui să crească tot timpul, ceea ce se poate observa atât din ecuația de echilibru termic ( ) cât și din relația ( ) Astfel, curbele (hiperbole) de putere egală ar trebui să intersecteze CVC-ul diodei, ținând cont de generarea de căldură în joncțiunea pn, într-un singur punct (Fig) Cu toate acestea, defalcarea termică are loc de-a lungul unui cablu cu o secțiune transversală foarte mică Dacă ar fi posibil să se izoleze un filament din întreaga joncțiune p-n, atunci CVC-ul acestuia ar corespunde tuturor condițiilor de defalcare termică (curba din Fig) Prin restul joncțiunii p-n, aria care este cu câteva ordine de mărime mai mare decât secțiunea transversală a cablului, curge un curent invers, adică poate fi caracterizat printr-o anumită rezistență R Pentru simplitate, vom considera constanta rezistenței R - cu o caracteristică liniară I-V (curba) Dacă rezistența R se dovedește a fi mai mică decât valoarea absolută a rezistenței diferențiale negative a cablului în secțiunea de cădere a CVC-ului său, atunci CVC total al diodei (curba) va avea o formă în formă de Y În consecință, caracteristicile I-V în formă de y nu contrazic mecanismul de defalcare termică a diodei După cum sa menționat, tensiunea de defectare în timpul defecțiunii termice scade odată cu creșterea temperaturii ambientale Cu toate acestea, defectarea termică poate fi precedată de o defecțiune de avalanșă, care se caracterizează printr-un pozitiv coeficientul de temperatură al tensiunii de defalcare Prin urmare, dependența de temperatură Tensiunea de defalcare pentru o diodă în

prezența defecțiunilor termice și de avalanșă poate fi complexă și chiar nemonotonă, deoarece la temperaturi ridicate, defectarea termică poate apărea fără o defecțiune anterioară de avalanșă § EFECTUL STĂRILOR DE SUPRAFAȚĂ ASUPRA VOLT-AMPERULUI CARACTERISTICI DIODE Într-o diodă semiconductoare reală, joncțiunea electrică de redresare merge în mod necesar la suprafața semiconductorului În acest sens, starea suprafeței afectează CVC-ul diodei Această influență este mult mai pronunțată pe ramura inversă a caracteristicii I-V, deoarece curenții inversi sunt foarte mici Orez Influența câmpului "rx-states pe ramura inversă a diodei BAC: O - fără a lua în considerare stările de suprafață; / - luarea în considerare a generării de purtători de sarcină la suprafață; - în prezența unui canal de conductivitate electrică de suprafață; - la J strat îmbogățit pe suprafata de baza Natura influenței stărilor de suprafață depinde de semnul și valoarea sarcinii de suprafață Să luăm în considerare trei variante posibile ale influenței stărilor de suprafață Generarea purtătorului de taxă pe suprafața semiconductorului Generarea și recombinarea purtătorilor de sarcină pe suprafața unui semiconductor, de regulă, sunt mai intense decât în volumul său (vezi §) Curenții inversi ai unei diode semiconductoare sunt afectați de generarea purtătorilor de sarcină pe suprafață în același mod ca generarea de purtători în volum Cu toate acestea, curenții inversi ai diodei depind de rata de generare a suprafeței, iar rata de generare a suprafeței se poate modifica în timp datorită modificărilor încărcăturii de suprafață În orice caz, curenții inversi ai diodei, ținând cont de generarea de purtători de sarcină la suprafață, ar trebui: Canale de conducție de suprafață Dacă există o sarcină de suprafață mare pe suprafața semiconductorului, care coincide în semn cu sarcina purtătorilor principali de la baza diodei, atunci o astfel de sarcină de suprafață respingătoare Orez Distorsiunea limitelor tranziției p- sub influența unei sarcini de suprafață: a - când se formează un strat invers pe suprafața bazei diodei; b - la imagine strat îmbogățit pe suprafața bazei diodei îndepărtează purtătorii majoritari de pe suprafața bazei și atrage purtătorii minoritari la suprafață, ceea ce duce la formarea unui strat invers pe întreaga suprafață a bazei (Fig , a) Când apare un strat invers, aria joncțiunii pn crește Acum, extragerea purtătorilor minoritari din bază va avea loc nu numai din stratul de bază cu o grosime Lp adiacent joncțiunii pn din volum, ci și din același strat adiacent suprafeței de bază (Fig , a) Prin urmare, Defalcarea de suprafață Defalcarea de suprafață a unei joncțiuni p-n se numește o defalcare a tranziției, care are loc în punctul în care tranziția iese pe suprafața cristalului și a cărei tensiune de rupere este influențată de stările de suprafață Dacă sarcina de suprafață (sarcina stărilor de suprafață) are semnul opus purtătorilor principali în baza diodei, atunci se formează un strat îmbogățit pe suprafața bazei (vezi §) Datorită apariției unui strat îmbogățit, grosimea joncțiunii pn la suprafața de bază scade, deoarece câmpul electric de difuzie al tranziției pătrunde în stratul îmbogățit la o adâncime mai mică b) ¿G-> este Căile de mișcare ale purtătorilor de sarcină minoritari în prezența unui canal de conducție de suprafață pe suprafața de bază (a) și distribuția tensiunii de-a lungul canalului ( ) iprgyu o Fig Dependența tensiunii de rupere a diodei de sarcina de suprafață, care creează un strat îmbogățit lângă suprafața bazei, la diferite concentrații de impurități în bază (vezi Fig ,) Influența sarcinii de suprafață afectează în principal regiunea bazei, deoarece rezistivitatea acesteia este mare Datorită grosimii mai mici a joncțiunii pn în apropierea suprafeței, defalcarea diodei se va

produce exact acolo, iar tensiunea de rupere va fi cu atât mai mică, cu atât mai mare este îngustarea joncțiunii de lângă suprafață (vezi Fig , curba)) Astfel, valoarea tensiunii de ruptură depinde în acest caz de densitatea stărilor de suprafață sau de valoarea sarcinii de suprafață care creează un strat îmbogățit în apropierea suprafeței de bază (Fig) Prin natura sa, deteriorarea suprafeței poate fi avalanșă, tunel sau termică § PROCESE ÎN DIODDCH LA MARE CURENT CONTINU Înainte de a lua în considerare fenomenele din diodele semiconductoare la curenți continui mari, să stabilim conceptele nivelului de injecție Prin nivelul de injecție înțelegem raportul dintre concentrația purtătorilor minoritari și concentrația purtătorilor majoritari în starea de echilibru (sau, ceea ce este aproape aceeași, concentrația de impurități) Considerăm că un nivel scăzut de injecție este unul la care concentrația purtătorilor minoritari injectați este semnificativ mai mică decât concentrația purtătorilor majoritari în starea de echilibru, adică pentru un semiconductor purtător de apă de tip n Rp - Rpo = Lrp) Printre diferențele și co-tipurile diferențiale de diode zener se numără rezistența mare a pinii de la tensiunea stației cu avalanșă, bilizarea diverșilor stabilizatori, în legătură în serie cu joncțiunea p-n a diodei zener a joncțiunii p-n suplimentare conectate în direcția înainte Odată cu creșterea temperaturii, tensiunea la joncțiunea p-n conectată direct scade (vezi §), ceea ce compensează creșterea tensiunii la joncțiunea p-n conectată invers în timpul defectării sale de avalanșă ca o diodă Zener, adică despre capacitatea sa de a se stabiliza pentru a schimba tensiunea atunci când curentul de trecere se modifică, poate fi judecat după valoarea rezistenței diferențiale a diodei zener Gst care este determinată de raportul dintre creșterea tensiunii de stabilizare și creșterea mică a curentului care a provocat-o Deoarece anumite modificări de curent pentru o mai bună stabilizare trebuie să corespundă unor modificări minime de tensiune, calitatea diodei zener este mai mare dacă are o rezistență diferențială mai mică Dependența generalizată a rezistenței diferențiale de tensiunea de stabilizare a multor diode zener este prezentată în fig , Pentru fabricarea de diode zener de înaltă tensiune cu avalanșă, este necesar ca material semiconductor de pornire siliciu de înaltă rezistență Cu cât este necesară o tensiune de stabilizare mai mare, cu atât rezistivitatea siliciului original ar trebui să fie mai mare În timpul funcționării diodei Zener, adică în timpul ionizării de impact în joncțiunea pn, rezistența de volum a bazei diodei Zener de înaltă tensiune afectează valoarea rezistenței diferențiale Prin urmare, cu o creștere a tensiunii de stabilizare, rezistența diferențială a j o j Orez , Diagrame energetice care explică creșterea rezistenței diferențiale cu scăderea sarcinii de stabilizare pentru stabili litri cu ruperea tunelului: a - pentru o diodă zener cu tensiune de avarie Încerca; pentru dioda zener cu tensiune de defalcare HnpMi wR), atunci posibilele fenomene de rezonanță nedorite apar doar la frecvențe la care dioda tunel nu va mai avea o rezistență diferențială negativă Inegalitatea wo > WR, ținând cont de relațiile ( ) și ( ), transformăm astfel: L diode bogate, varicaps? De ce diodele peacock-span au rezistență diferențială negativă numai la anumite frecvențe ale microundelor? Potrivit lui, varicaps ar trebui să funcționeze numai atunci când tensiunea este inversă DC polarizare? De ce este folosită numai capacitatea de barieră în varicaps și nicio capacitate de difuzie? capitol Tranzistoare bipolare § t STRUCTURA ȘI MODURI DE BAZĂ DE OPERARE Un tranzistor bipolar (denumit în mod obișnuit pur și simplu tranzistor) este un dispozitiv semiconductor cu două joncțiuni

electrice redresoare care interacționează cu trei (sau mai multe) conductori, ale căror proprietăți de calificare sunt determinate de fenomenele de injecție și extracție de purtători minori celule de încărcare O reprezentare schematică a structurii tranzistoarelor bipolare cu joncțiuni electrice redresoare sub formă de joncțiuni pn este prezentată în fig Interacțiunea între joncțiuni p-tt va exista dacă grosimea regiunii; gi între joncțiuni (grosimea bazei) este mult mai mică decât lungimea de difuzie a purtătorilor de sarcină minoritari În acest caz, purtătorii de sarcină injectați printr-una dintre joncțiunile pn atunci când este polarizat în direcția înainte pot ajunge la o altă joncțiune care se află sub tensiune inversă și își pot schimba curentul Astfel, interacțiunea tranzițiilor electrice redresoare ale unui tranzistor bipolar se manifestă prin faptul că curentul uneia dintre tranziții poate controla curentul altei tranziții Fiecare dintre joncțiunile p-n ale tranzistorului poate fi polarizat direct sau invers În funcție de aceasta, se disting trei moduri de funcționare a tranzistorului:) modul cutoff - ambele joncțiuni p-n sunt polarizate invers, în timp ce curenți relativ mici trec prin tranzistor;) modul de saturație - ambele joncțiuni pn sunt polarizate direct, în timp ce curenți relativ mari trec prin tranzistor;) modul activ - una dintre joncțiunile pn este deplasată în direcția înainte, iar cealaltă în direcția opusă În modurile de tăiere și saturație, nu există aproape niciun control al tranzistorului În modul activ, un astfel de control este efectuat cel mai eficient, iar tranzistorul poate îndeplini funcțiile unui element activ al circuitului electric (amplificare, generare, comutare etc) Zona tranzistorului, situată zhennuyu între p-p-joncțiuni, pe- numită bază Zonele adiacente bazei sunt cel mai adesea inegale Una dintre zone este realizată astfel încât din ea cel mai p p bazează p aJ purtătorii au fost injectați eficient în bază, iar celălalt - astfel încât joncțiunea p-n corespunzătoare să funcționeze cel mai bine extragerea purtătorilor de la bază Zona tranzistorului, al cărui scop principal este in-p p baza p se numește injectarea purtătorilor în bază J emițător, joncțiunea pn corespunzătoare este emițător Orez Izo-Regiune schematică a tranzistorului, principala fermentație a structurilor bipolare, al cărei scop este ex- tranzistoare: tracțiunea purtătorilor de la bază, nume-a -p-p-p-tip; Tipul -p-p-p este un colector, joncțiunea p-p corespunzătoare este un colector } Dacă la joncțiunea emițătorului tensiunea este directa, iar pe colector este inversa, atunci includerea tranzistorului este considerata normala, cu polaritatea inversa a tensiunilor, este inversa Orez Una dintre structurile re- Partea bazei dintre al tranzistorului: emițător și colector, prin - emițător; - colector; - pe care purtătorii de sarcină ai electrodului eCHI o trec în regiunea de bază; - activ; - pasiv; -ne în modul activ de funcționare, partea tranzitorie a bazei magazinului se numește partea activă (Fig) Partea bazei situată între emițător și terminalul de bază se numește pasivă, iar partea care se află în spatele terminalului de bază se numește periferică Principalele caracteristici ale tranzistorului sunt determinate în primul rând de procesele care au loc în bază În funcție de distribuția impurităților în bază, un câmp electric poate exista sau nu Dacă, în absența curentului în bază, există un câmp electric care contribuie la mișcarea purtătorilor de sarcină minoritari de la emițător la colector, atunci tranzistorul se numește deriva, dacă nu există câmp în bază, deriva- gratuit Valoarea intensității câmpului electric în baza tranzistorului în absența curenților poate fi determinată din expresia pentru curentul

purtătorilor principali De exemplu, pentru o bază cu conductivitate electrică de tip n de aici E = ! ! ! grad n " (, ? q ηπο Dacă luăm în considerare faptul că concentrația purtătorilor principali de sarcină este practic egală cu concentrația de impurități, atunci pentru semiconductor porecla de tip n primim R Emite- ter N E R p Komek-Baza tor X ΊY I X E = ! : ! oraș N · (,) q Chd , pentru semiconductori de tip r E = kT oraș Na ( ) q Na Astfel, apariția unui câmp electric este asociată cu prezența unui gradient de concentrație a impurităților Din punct de vedere fizic, acest lucru se explică prin faptul că gradientul de concentrație al purtătorilor principali de sarcină ar trebui să provoace redistribuirea acestora În acest caz, purtătorii principali părăsesc regiunea cu o concentrație mai mare, lăsând încărcături parțial necompensate de ioni de impurități, iar în regiunea cu o concentrație scăzută de impurități, purtătorii principali se acumulează Câmpul electric rezultat este întotdeauna direcționat în așa fel încât să contribuie la mișcarea purtătorilor minoritari din concentrația de impurități și regiunea electrică cu o concentrație mare a câmpului tric la baza trans- Orez Distribuția con-impurităților în regiune cu o mică concentrație realizată prin metodă În consecință, câmpul care este sursa difuziei: propriu mișcării minorului - secțiunea câmpului de frânare, - secțiunea câmpului de accelerare al purtătorilor de la emițător la colector, se creează dacă concentrația de impurități necompensate în bază scade pe direcția de la emițător la colector O astfel de distribuție a impurităților în bază se obține, de exemplu, la fabricarea unui tranzistor prin difuzie (Fig) Cu toate acestea, în cazul E'(OM), poate apărea o secțiune în care câmpul va împiedica mișcarea purtătorilor de la emițător la colector (câmp de întârziere), ceea ce de obicei înrăutățește proprietățile tranzistorului Există trei scheme de comutare a tranzistorului: cu un emițător comun, o bază comună și un colector comun Denumirea generală este electrodul, în raport cu care se măsoară și se stabilesc tensiunile Curentul din circuitul electrodului comun nu este determinat Proprietățile de amplificare ale tranzistorului se manifestă dacă, într-un circuit cu o bază comună, un circuit emițător este utilizat ca circuit de intrare, iar un circuit colector este utilizat ca circuit de ieșire Într- un circuit emițător comun, intrarea este circuitul de bază, iar ieșirea este circuitul colector Pentru un circuit cu colector comun, intrarea este circuitul de bază și ieșirea este circuitul emițător Principalele proprietăți ale unui tranzistor sunt determinate de raportul dintre curenți și tensiuni din diferitele sale circuite și influența lor reciprocă unul asupra celuilalt Tranzistorul poate funcționa pe DC, AC mic, AC mare și impuls Pentru a lua în considerare funcționarea unui tranzistor în curent continuu, este necesar să se studieze fluxurile de purtător staționar în acesta Acest face posibilă obţinerea de caracteristici statice şi statice Parametrii cal ai unui tranzistor sunt rapoartele dintre curenții și tensiunile sale continue, exprimate grafic sau ca valori numerice Funcționarea unui tranzistor cu un semnal alternant mic, pe lângă fluxurile staționare de purtători de sarcină, este, de asemenea, afectată de procesele de acumulare a purtătorilor, de capacitățile din tranzistor, precum și de viteza finală a purtătorilor Proprietățile unui tranzistor atunci când funcționează pe un semnal variabil mic sunt descrise de sisteme de parametri de semnal mic Atunci când funcționează pe un semnal mare și pe un semnal în impulsuri, pe lângă acei factori care determină funcționarea tranzistorului pe un curent continuu și un semnal alternativ mic, neliniaritatea caracteristicilor statice ale tranzistorului afectează

semnificativ § DISTRIBUȚIA DEBITURILOR STATIONARE ÎNTR-UN PURTATOR!il ZARZIDA Considerăm distribuția fluxurilor purtătoare într-un tranzistor folosind exemplul unei structuri de tip p-n-p Modul activ Prin joncțiunea emițătorului unui tranzistor care funcționează în modul activ, purtătorii de sarcină sunt injectați în bază (Fig , a) Purtătorii injectați (curenți/er) se recombină parțial în volum baza și pe suprafața acesteia, iar unele dintre ele pot ajunge la o tranziție ohmică cu baza și se recombină pe aceasta (curenți / râuri Ireks / rec con) Purtătorii injectați rămași traversează baza, ajung la joncțiunea colectorului și își măresc curentul invers La curentul de purtători de sarcină injectat de emițător și care ajunge la colector (/cr), se adaugă curentul de purtători formați ca urmare a generării termice în bază (gena /), în colector (gena /k), și, de asemenea, în joncțiunea colector (/genă) În plus, la tensiuni suficient de mari în joncțiunea colectorului / (aJ Fig Distribuția fluxurilor staționare de purtători de sarcină în tranzistor: a - modul activ; Modul -saturație este o multiplicare de avalanșă a purtătorilor (/l) Pe suprafața semiconductorului pot exista și curenți de scurgere Toți acești curenți formează împreună curentul de colector Prin emițător, pe lângă curentul purtătorilor de sarcină injectat în bază (/er), trece și curentul purtătorilor injectați de la bază în emițător (/ep) În regiunea emițătorului, acești purtători se dovedesc a fi minori și se recombină În plus, prin joncțiunea emițătorului trece un curent, asociat cu recombinarea purtătorilor în regiunea de încărcare spațială (/erek), iar uneori (la curenți totali mici) trebuie luat în considerare și curentul de scurgere Curentul care trece la terminalul de bază este suma algebrică a curenților purtătorilor principali, care provoacă injectarea purtătorilor în emițător (/ep), recombinare în joncțiunea emițătorului (/erek) și în bază (/rekv + Irekz), curenții de colector invers a tranziție (/Bgen + Il + Igen + Ikgen), precum și curentul purtătorilor de sarcină minoritari care au atins ieșirea de bază (/rec con) Valoarea și direcția curentului de bază sunt determinate de raportul acestor componente Dacă luăm în considerare distribuția curenților în tranzistor din punctul de vedere al influenței reciproce a emițătorului și colectorului, atunci se dovedește că numai componenta íκρ a curentului colectorului depinde semnificativ de curentul emițătorului, datorită purtătorilor injectați în bază de către emițător și ajungând la colector, precum și la componenta curentă asociată cu reproducerea avalanșei în joncțiunea colectorului (/l) Toate celelalte componente ale curentului colectorului fie nu depind deloc de curentul emițătorului, fie această dependență este slabă (Chkgen) În plus, nu întregul curent al emițătorului afectează valoarea curentului colectorului, ci doar componenta acestuia /er, asociată cu injectarea de purtători minoritari în bază Componentele curentului emițătorului asociate cu injecția de la bază în emițător (/ep) și recombinarea în regiunea de încărcare spațială (/erek), deși depind de tensiunea de la joncțiunea emițătorului, nu afectează direct curentul colectorului Pentru ca curentul emițătorului să controleze eficient curentul colectorului, se iau măsuri pentru a reduce toate componentele curente care nu participă la un astfel de control În primul rând, încearcă să reducă pierderea purtătorilor de încărcare injectați în bază Pentru aceasta:) grosimea bazei este redusă în comparație cu lungimea de difuzie a purtătorilor de sarcină minoritari, ceea ce reduce pierderile de recombinare în volumul bazei (/rec,,);) suprafața semiconductorului este tratată astfel încât să se obțină cea mai mică valoare posibilă a ratei de recombinare a suprafeței (reduceți fpeKs);) ieșirea bazei

este situată atât de departe de emițător încât orificiile practic nu ajung la el (scădere / rek con);) dimensiunile colectorului sunt realizate astfel încât să poată intercepta întregul flux de purtători care provin de la emițător, adică aria joncțiunii colectorului trebuie să fie mult mai mare decât aria joncțiunii emițătorului Ca urmare a acestor măsuri (,) Pentru a reduce componenta curentă a purtătorilor injectați de la bază în emițător (/ep), concentrația de impurități în bază se face mult mai mică decât în emițător Acest lucru duce la faptul că curentul prin joncțiunea emițătorului constă practic din purtători de sarcină injectați în bază, adică coeficientul de injecție (raportul dintre curentul de gaură și curentul total prin joncțiune) este mare Utilizarea fenomenului de ionizare prin impact pentru a crește curentul colectorului este cel mai adesea irațională, deoarece duce la o dependență puternică a curentului Il de tensiunea de pe colector, adică la funcționarea instabilă a tranzistorului Acest fenomen este utilizat numai în tranzistoarele de avalanșă Luând în considerare toate măsurile de mai sus, putem presupune că curentul de colector al tranzistorului în modul activ este aproximativ egal cu curentul emițătorului: ÍK-De, ( ), iar curentul de bază este mult mai mic decât atât curentul emițătorului, cât și curentul colectorului: (,) Luați în considerare modul în care are loc amplificarea într-un tranzistor în modul activ de funcționare Într-un circuit cu o bază comună (Fig), același p , p i + : eu Znit- ter Iboza, ' R IK AL ! K- I curent de torus, ca în intrare (emițător), adică nu există un câștig de curent în acest caz Cu toate acestea, această schemă ma face posibilă obținerea amplificării puterii Pentru a înțelege principiul amplificării puterii într-un tranzistor și în alte dispozitive de amplificare, este necesar să se țină cont de interacțiunea purtătorilor pentru Orez Schema de pornire a rândului trans cu un câmp electric Un nazistor cu o bază comună este un exemplu, o gaură, care se mișcă în direcția câmpului electric, este absorbit în acest câmp și dobândește energie suplimentară, îndepărtându-l de câmpul electric Dacă, pe de altă parte, gaura este forțată să se miște împotriva câmpului electric, atunci aceasta va fi decelerata de acest câmp, oferindu-i o parte din energia sa Câmpul electric din joncțiunea colector a tranzistorului constă dintr-o componentă constantă creată de o sursă de alimentare externă în circuitul colector și o componentă alternativă care apare în timpul extragerii purtătorilor minoritari de la bază la joncțiunea colectorului Valorile instantanee ale componentei variabile a câmpului electric în orice moment de timp sunt direcționate în direcția opusă componentei constante Prin urmare, o gaură, care trece prin joncțiunea colectorului, interacționează simultan cu două componente ale câmpului electric Din componenta constantă a câmpului electric, gaura preia energie, mișcându-se în direcția acestei componente În același timp, deplasându-se față de valorile instantanee ale componentei variabile a câmpului electric, gaura cedează o parte din energia sa componentei variabile Există un fel de transfer de energie de la componenta constantă a câmpului electric la componenta variabilă Intermediarii în acest transfer de energie sunt purtători de sarcină injectați de la emițător și ajungând la joncțiunea colectorului Pentru injectarea lor, este necesară o muncă relativ mică, deoarece înălțimea barierei de potențial a joncțiunii emițătorului este mică Într-un circuit cu un emițător comun: m, circuitul de intrare este circuitul de bază Deoarece curentul de bază este mult mai mic decât curentul emițătorului, se poate obține și câștig de curent Schimbând curentul prin terminalul de bază, schimbăm numărul de purtători principali din regiunea de bază, adică sarcina bazei și, în consecință,

bariera de potențial dintre emițător și bază O modificare a înălțimii barierei de potențial determină o injectare corespunzătoare a purtătorilor de sarcină minori Majoritatea purtătorilor injectați ajung la joncțiunea colectorului, schimbându-i curentul Purtătorul de sarcină principal introdus în bază de la terminalul bazei poate fie să dispară din cauza recombinării, fie poate fi injectat în emițător După cum sa indicat, tranzistorul a luat măsuri pentru a se asigura că probabilitatea acestui lucru este mică și, pentru un purtător de sarcină major care a intrat în bază, există mulți purtători de sarcină minoritari care au trecut de la emițător la colector Acesta este câștigul de curent în circuitul emițător comun Câștigul de putere în acest caz este explicat în mod similar câștigului dintr-un circuit de bază comun Într-un circuit colector comun, circuitul de ieșire este circuitul emițător, circuitul de intrare este circuitul de bază Datorită faptului că curentul emițătorului este aproape egal cu curentul colectorului, există și o creștere a curentului și a puterii Modul de saturație Când tranzistorul este în modul de saturație (vezi Fig ,) în direcția înainte, nu este inclus doar emițătorul, ci și joncțiunea colectorului Asta duce la că nu toţi purtătorii injectaţi de emiţător şi ajungând la joncţiunea colectorului sunt interceptaţi de acesta În mod convențional, putem presupune că spre fluxul purtătorilor minoritari care merg de la bază la colector, există un flux al acelorași purtători de la colector la bază, iar curentul lor total este determinat de diferența acestor fluxuri Datorită faptului că în modul de saturație joncțiunea colectorului nu mai realizează extracția completă a purtătorilor de la bază, acolo au loc acumularea și recombinarea intensă a acestora În modul de saturație, relațiile ( ) și ( ) nu sunt îndeplinite, curentul de bază poate fi comparabil cu curentul emițătorului Modul de întrerupere Dacă tensiunea este inversată la ambele joncțiuni ale tranzistorului, atunci curenții trec prin ele din cauza proceselor de generare termică a purtătorilor de sarcină în cea mai mare parte a semiconductorului, a regiunilor de încărcare spațială și a joncțiunilor ohmice, precum și a scurgerilor La tensiuni suficient de mari, are loc propagarea avalanșelor § DISTRIBUȚIA PURTĂTORILOR CfCJDd Valorile curenților din tranzistor depind de distribuția purtătorilor de sarcină minoritari din acesta Această distribuție este influențată de mulți factori - dimensiunile geometrice ale tranzistorului, parametrii materialului său, starea suprafeței, curenții prin joncțiuni, tensiunile pe ele etc Modul activ Modul activ de funcționare al tranzistorului se caracterizează prin faptul că, datorită prezenței tensiunii inverse • R X E:; f p Pп OT! '" /(:s) A) · · Pr, Rp gD În acest caz, joncțiunea colectorului interceptează aproape toți purtătorii de sarcină care se apropie de limita sa Drept urmare, purtătorii din tranzistor se deplasează într-o zonă mică, care este aproximativ egală ca suprafață cu joncțiunea emițătorului (Fig , a), adică numai prin partea activă a bazei Doar câtiva transportatori deviază de la direcția perpendiculară pe joncțiunea emițătorului, iar unele dintre ele se recombină la suprafață Datorită faptului că majoritatea purtătorilor dintr-un tranzistor care funcționează în modul activ se deplasează pe căi paralele, cu suficientă precizie în scopuri practice, distribuția lor poate fi considerată unidimensională, adică putem presupune că concentrația purtătorului se modifică numai în direcția X, perpendiculară pe planul emițătorului sau colectorului Legea de distribuție a purtătorilor de sarcină în această direcție este determinată de câmpul electric din regiunea bazei și de grosimea acesteia w O expresie analitică

aproximativă pentru o astfel de lege poate fi obținută dacă ținem cont de faptul că curenții de emițător și de colector ai tranzistorului sunt aproape aceiași Deoarece purtătorii de sarcină se deplasează pe căi paralele, ceea ce înseamnă că densitatea de curent a purtătorilor minoritari dintre emițător și colector este constantă, ceea ce este aproximativ egală cu densitatea de curent a emițătorului Ier ecuația pentru distribuția, de exemplu, a găurilor de la baza unui tranzistor p-p-p va lua forma dp η JED Er \u d qPn tsr -q r ( ) dx sau luând în considerare ( ) dN dpn J Er= -qDppn \GTX ~qDp dx = ( ) unde N este concentrația de impurități din bază Condițiile la limită pentru cazul în care curenții din tranzistor nu sunt foarte mari vor fi (Fig): la x \u d p (o) exp pReB N \u d N ( ) , pn \u d nu kg '( ) cu x \u d w (,) Coordonatele x= și x=w corespund limitelor regiunilor de încărcare spațială ale joncțiunilor emițătorului și colectorului (Fig) Datorită faptului că viteza de mișcare a purtătorilor de sarcină în regiunea tranziției colectorului vp este destul de mare, presupunem că la X=w Pп=O Rezolvând ecuația ( ) în raport cu concentrația purtătorilor în baza tranzistorului, obținem w Ier {'Nd Pn= Jx (,) qN X Dp qDp Pentru un tranzistor fără deriva N =const; deci Dp=const și pPn= wx ( )(,) Astfel, distribuția purtătorilor de sarcină injectate de emițător în baza unui tranzistor fără derivă este liniară (Fig ,) Această concluzie este similară cu cea obținută mai devreme pentru dioda semiconductoare cu bază subțire (vezi §) și, ca și pentru dioda semiconductoare, este doar un caz limitativ Distribuția reală a purtătorilor în baza unui tranzistor fără derivă diferă de una liniară, deși doar puțin Pentru tranzistoare, precum și pentru diodele semiconductoare, se poate găsi distribuția purtătoarelor în regiunea emițătorului (ca într-o diodă cu direct pornit) și un colector (ca într-o diodă inversată), așa cum se arată în Fig , Pentru un tranzistor în derivă la o valoare constantă a intensității câmpului electric în bază (aceasta corespunde unei distribuții exponențiale a impurităților) fără a lua în considerare dependența lui Dp de N Pn= ! d { -exp [-~ (w-x)]}= qppE kT [-{N(w)) -x ;] ( ) Ier w -qrr, ; N(O) N(O) ' η N (w) Distribuția corespunzătoare a concentrației de purtător este prezentată în Fig , c În acest caz, valoarea absolută a gradientului de concentrație a purtătorului crește pe măsură ce ne apropiem de joncțiunea colectorului Cu electric suficient de puternic În câmpurile magnetice din bază, gradientul de concentrație a purtătorului în apropierea emițătorului devine mic, adică curentul aici este predominant în derivă În apropierea colectorului, concentrația purtătorilor injectați scade, iar componenta de derivă a curentului scade și ea, dar componenta de difuzie crește; deci curentul total rămâne constant Cu o astfel de distribuție a impurităților, atunci când se creează o secțiune a câmpului de decelerare, se obține distribuția concentrației de purtător în bază, așa cum se arată în Fig , , g câmpul electric corespunde unei creșteri accentuate a concentrației purtătorilor și a gradientului acestuia la emițător Modul de saturație În modul de saturație, purtătorii de sarcină din regiunea de bază a tranzistorului se deplasează nu numai de la emițător la colector, ci și către ieșirea de bază În consecință, distribuția lor se modifică În același timp, în partea pasivă a bazei este creată o concentrație semnificativă de purtători de sarcină minori În plus, o tensiune directă peste joncțiunea colectorului duce la injecția în regiunea colectorului pr, Rp O oJ Pro W Pro X /f : G aJ Lr, Rp) O Despre w tranzistor în modul de saturație: a - în spațiu (schematic); - într-un tranzistor fără deriva; in -in deriva- tranzistorul Toate acestea nu

fac posibilă extinderea la regimul de saturație a celor obținute anterior prin calcularea distribuției purtătorilor Prin urmare, ne restrângem la caracteristicile calitative (Fig) Între emițător și colector, distribuția purtătorilor este determinată de raportul tensiunilor la joncțiunile pn și intensitatea câmpului electric din bază Pentru fără derivă primul tranzistor, dacă tensiunea la joncțiunea colectorului este mai mică decât la joncțiunea emițătorului, concentrația purtătorilor de sarcină minori la colector este mai mică (Fig ,) Datorită recombinării în bază, legea distribuției nu este complet liniară Prezența unui câmp electric în baza tranzistorului de deriva contribuie la deplasarea purtătorilor de sarcină către colector În plus, în acest caz, concentrația de impurități din bază lectorul este mic; în consecință, diferența de potențial de contact în joncțiunea colectorului este mai mică decât în joncțiunea emițătorului Prin urmare, chiar și cu tensiuni directe mai mici la colector decât la emițător, concentrația de purtători în baza joncțiunii colectorului poate fi mai mare decât cea a joncțiunii emițătorului (Fig , c) Distribuția purtătorilor în bază spre terminalul acesteia este determinată de injectarea purtătorilor minoritari prin joncțiuni pn și de recombinarea purtătorilor atât în volum, cât și pe suprafața regiunii de bază Modul de tăiere În modul de tăiere, părțile tranzistorului adiacente joncțiunilor sale sunt foarte epuizate în purtători de sarcină minoritari § CURENTUL DC ÎN MOD ACTIV Distribuțiile concentrației purtătoarelor obținute în § fac posibilă scrierea expresiilor analitice pentru curenții continui într-un tranzistor care funcționează în modul activ Componenta principală a curentului din tranzistor - curentul purtătorilor de sarcină injectat de la emițător în bază, se găsește în funcție de distribuția purtătorilor în bază ( ) prin înlocuirea x = și a valorii concentrației corespunzătoare din ( )) În plus, pentru a trece de la densitatea de curent la curent, este necesar să se înmulțească expresia rezultată cu aria emițătorului S, Când calculăm, obținem (,) Pentru tranzistor fără deriva / , , S,qp oDp exp qUo (,) Ei, , w kT ' care este aproape analogă cu expresia pentru semiconductor de curent continuu diodă de nichel cu bază subțire (vezi §) Pentru tranzistorul de deriva cu E=const și Dp=const În N(O) / , , S,qp o( )Dp N(w) (,) Er, , -WN(w) exp -TT-, - NU) Compararea expresiilor obținute arată că pentru aceleași dimensiuni și tensiuni, curentul emițătorului tranzistorului de deriva este mai mare decât cel al celui fără derivă Pentru a determina curentul total al emițătorului, este necesar, în conformitate cu cele menționate în § , să se adauge la Ier componentele de curent asociate cu injectarea purtătorilor de la bază în emițător și recombinarea în joncțiunea pn a emițătorului emițător Ambele componente sunt calculate în același mod ca pentru o diodă semiconductoare (vezi § și): (exp q~ ; B -), (,) f ep -S qn,{J, kT pIe (,) Erek -e (I) exp kT " q (/)con-EB Curentul de bază datorat recombinării purtătorilor în volumul său și la suprafață poate fi găsit și din distribuția purtătorului Zona în care excesul de concentrație este pozitiv, adică unde are loc procesul de recombinare a purtătorilor, este situată între emițător și colector (Fig , a) De obicei, concentrația purtătorilor de sarcină injectați o depășește vizibil pe cea de echilibru în care (,) Prin integrarea peste volumul regiunii în care se creează excesul de concentrare, obținem www fpeKH=qS s~dx=~S(! s~dx)dx (,) o' p B și densitatea-durata de viață a purtătorilor din bază cresc, de asemenea, curentul de injecție al emițătorului · ra /er la unele schimbări de tensiune La schimbarea timpului IeB între concluziile vieții emnt în

volum, se adaugă măsurarea bazelor (b) modificarea vitezei de recombinare a suprafeței Ca urmare a relației dintre curentul de bază și curentul emițătorului ( ) și ( ) sunt distorsionate Redistribuirea tensiunilor Când curenții trec prin rezistențele volumetrice, asupra acestora se creează căderi de tensiune corespunzătoare În regiunea de bază, căderea de tensiune este cea mai semnificativă datorită trecerii curentului din spațiul dintre emițător și colector la borna de bază (Fig , a) Deoarece grosimea bazei este foarte mică, rezistența acesteia poate fi destul de mare Ca urmare, căderea de tensiune la joncțiunea emițătorului diferă de tensiunea dintre emițător și bornele de bază și nu este aceeași (ceea ce este foarte semnificativ) în diferite puncte ale emițătorului (Fig ,) Acest lucru duce la faptul că curentul emițătorului este diferit în puncte diferite; în plus, crește spre marginea emițătorului, adică, pe măsură ce curentul crește, părțile mijlocii ale joncțiunii emițătorului par să înceteze să funcționeze - injecția are loc în principal de-a lungul marginii emițătorului Schimbarea condițiilor la tranziții În modul activ de funcționare a tranzistorului la curenți mari, condițiile de la joncțiunea colectorului se pot schimba Acest lucru se datorează (vezi §) saturației vitezei de derivă a purtătorilor În acest caz, concentrația de purtători în baza de lângă colector nu poate fi considerată egală cu zero, așa cum sa făcut în § , - valoarea sa tinde spre Icr / (qvpmax) Acest fenomen presupune o redistribuire a transportatorilor în baza de date Dacă pentru q p g- fără deriva, p out tranzistori din cauza semnificativă Koiiiiieigtor baza gradientului de concentrație a purtătorului în + întreaga bază și de obicei nu foarte mare densități de curent prin influența unei astfel de ne-OL ~- ,redistribuire poate fi neglijat, atunci a) w ' G - pentru tranzistoarele de deriva poate fi semnificativ efect de expansiune de bază Redistribuirea potențialului în regiunea încărcăturii de volum la curenți mari este) este, de asemenea, o consecință a saturației asupra vitezei purtătorilor Acțiune- Remarcabil, datorită faptului că purtătorii de încărcare se mișcă cu o viteză finită aproximativ concentrația lor în joncțiunea p-n este q diferită de zero, iar sarcina se adaugă la sarcina impurităților ionizate sau) se scade din aceasta Câmpul în tranziție este redistribuit corespunzător o -~ g Se consideră joncțiunea colectorului tranzistorului (Fig , a) Este ușor de verificat că taxa asociată cu non-Fig Redistribuirea purtătorilor majoritari, coincide cu densitatea de încărcare spațială în joncțiunea colectorului când semnează cu sarcini ionizate la curenți mari: mizerie în bază Prin urmare, datorită unei - o tranziție bruscă; b - tăierea prin trecerea joncțiunii dense de curent al colectorului cu o regiune puternic dopată a colectorului; în partea de trecere a numărului-difuzie a tranziției lectorului, atribuită bazei, crește, iar în partea atribuibilă colectorului, scade O astfel de modificare a densității de încărcare a spațiului este echivalentă cu o modificare corespunzătoare a concentrației de impurități În consecință, la curenți mari, aria încărcăturii spațiale din bază se îngustează, iar în colector se extinde Ec Um joncțiunea colectorului este ascuțită, ca de obicei pentru tranzistoarele fără deriva, iar regiunea colectorului este dopată foarte puternic (joncțiunea de aliaj), apoi la curenți mari, practic se modifică doar grosimea regiunii de bază (Fig ,)) Când tranziția colectorului este lină (tranzistor de deriva), modificarea lățimii bazei este însoțită de o deplasare a ambelor limite ale regiunii de încărcare spațială către colector (Fig , c) Dacă densitatea de curent satisface condiţia fKp ~qNHCxVpmax apoi purtătorii de încărcare compensează complet încărcarea

impurităților din partea colector a joncțiunii, iar joncțiunea colectorului pare să dispară În acest caz, funcționarea tranzistorului este întreruptă § PARAMETRI STATICI Parametrii statici ai unui tranzistor sunt valorile curenților sau tensiunilor măsurate în anumite condiții, precum și unele relații între aceste valori Opțiuni pentru modul Cutoff Ca parametri statici care caracterizează modul de întrerupere, de obicei sunt alese valorile curenților emițătorului și colectorului Datorită faptului că în modul de tăiere există o anumită influență a unei tranziții a tranzistorului asupra altuia, acești curenți se găsesc în anumite condiții pentru pornirea tranzistorului Curenții inițiali de joncțiune sunt valorile curenților la tensiune inversă la orice joncțiune a tranzistorului, cu condiția ca tensiunea la cealaltă joncțiune să fie zero În practică, curenții inițiali se găsesc prin aplicarea unui scurtcircuit al ieșirii zonei corespunzătoare cu baza Deci, curentul inițial al colectorului Skak * este determinat atunci când bornele emițătorului și bază sunt scurtcircuitate, iar curentul inițial al emițătorului Cevk este determinat atunci când bornele colectorului și bază sunt scurtcircuitate Deoarece curenții inițiali de joncțiune ai unui tranzistor sunt de obicei destul de mici, un scurtcircuit al cablurilor corespunde unei tensiuni la joncțiune care este practic zero Conform definiției curenților inițiali, aceștia se găsesc la limita tranziției tranzistorului de la modul activ la modul de tăiere Să luăm în considerare, de exemplu, originea curentului Svk Când tensiunea la emițător este egală cu zero, doar componentele curentului emițătorului Rep și /erek merg la zero în timp ce în conformitate cu ( ) cu Ieb = s chpg = = O ï ( ) Er-w ~ i dx sau r Acest lucru se datorează faptului că atunci când se aplică tensiune la joncțiunea colectorului, purtătorii de sarcină minoritari sunt redistribuiți în bază, apare gradientul lor de concentrație și gradul corespunzător * În indici, prima literă înseamnă ieșirea în circuitul din care se face măsurarea (emițător E, colector K, bază B), a doua literă este ieșirea comună, a treia literă este modul de măsurare (K -scurtcircuit, -circuit deschis) actual Curentul inițial al colectorului este suma curentului Icr de asemenea, nu este egal cu zero și curenții inversi ai joncțiunii colectorului La tensiuni nu foarte mari (M =) SkBK = S,qn? -/rivers -/reks -/rivers con+ /Bgen + Skgen + Sgen (, } WN ~ij-dx o p Curentul inițial al emițătorului /eBC este format într-un mod similar ing, în timp ce curentul la unul dintre cele două terminale libere rămase este zero Deci, curentul invers al colectorului trans- rezistența dintr-un circuit cu o bază comună IkBO este determinată la un curent de emițător egal cu zero, iar curentul de emițător invers pentru același circuit /eBO este determinat la un curent de colector egal cu zero În mod similar, este posibil să se determine curentul de colector invers pentru un circuit cu un emițător comun kkeo (cu un curent de bază egal cu zero) Valoarea curentului /k poate fi găsită din ( ), ținând cont de faptul că în acest caz nu există curent de emițător și deci /cr = O Atunci /KBO = (/Bgen + fKreH + freH}M (,) Înlocuind această expresie în ( ), obținem /k = Mikr + IkBO· ( ) În consecință, curentul Ik o este componenta totală a curentului colectorului necontrolat de la emițător Curentul de bază / \u d / râuri + / rekz + / rek kon + cap + / erek - íκμ (M -) - / KBO (,) Și aici, /k este o componentă care nu depinde de curentul emițătorului În mod similar se determină curentul emițătorului invers /eBO Parametrii modului activ Parametrii statici ai modului activ caracterizează în principal gradul de influență a circuitului de intrare al tranzistorului (emițător, bază) asupra

ieșirii Acești parametri includ raportul de transfer al curentului static al bazei Ik -IkBo h (,) E = / + / · B KBO Înlocuind expresiile obținute în § pentru curenții de colector și de bază, obținem ww [\(\ N) - } -,}-dx dx+ d e a*m ti' N Dp ww +~r N d D r N d + (,) S,N(O) ~ fJ; X + N(O)L ~ ij; X w + ~ kT o~ DNP dx exp (-p IkeTB)-a*M +] η;τ q(Ike Caracteristici de ieșire Familia de caracteristici statice de ieșire ale unui tranzistor conectat conform unui circuit emițător comun este dată în fig , a Natura generală a acestor dependențe este similară cu natura ramurii inverse a CVC a diodei, deoarece cea mai mare parte a tensiunii sursei de alimentare a circuitului de ieșire scade la joncțiunea p-n a colectorului, conectat în sens opus Cu toate acestea, spre deosebire de caracteristicile de ieșire ale unui circuit cu o bază comună, caracteristicile de ieșire ale unui circuit cu un emițător comun au o pantă mult mai mare, adică există o dependență mare a curentului colectorului de tensiunea colectorului Motivele acestui fenomen sunt explicate în Fig , , care arată că odată cu creșterea tensiunii colectorului la un curent de bază constant, curentul emițătorului crește și, în consecință, crește curentul colectorului Reamintim că componenta principală a curentului de bază (recombinare) este aproximativ proporțională cu numărul total de găuri din bază și, prin urmare, este proporțională cu aria de sub curbele de distribuție a concentrației găurilor din bază Deplasarea în sus a caracteristicilor statice de ieșire are loc în conformitate cu formula ( ) și este asociată cu o creștere a curentului emițătorului, cu condiția ca tensiunea pe colector să fie constantă și curentul de bază să crească Este necesar să se noteze distanța diferită dintre caracteristicile de ieșire de-a lungul axei curentului pentru incremente egale ale curentului de bază La curenți de bază mici, curbele sunt aranjate frecvent, la curenți de bază mari, rar, și apoi din nou des Locația neuniformă a caracteristicilor este asociată cu o modificare a coeficientului de transfer DC de bază (P e) cu o modificare a curentului (vezi Fig) Într-un tranzistor conectat conform unui circuit cu un emițător comun, curentul Ikeo depășește curentul /quo pentru un circuit cu o bază comună (/keo \u d - acest lucru se explică prin faptul că cu un curent de bază egal cu zero, iar atunci când colectorului este aplicat tensiune în raport cu emițătorul (într-un circuit cu un emițător comun), joncțiunea pn a emițătorului se dovedește a fi pornită pentru o tensiune directă mică Prin urmare, curentul de colector invers crește datorită găurilor injectate de la emițător în bază Cu o tensiune a colectorului egală cu zero, adică cu un scurtcircuit al colectorului cu emițătorul și în prezența unui curent de bază, joncțiunea p-n a colectorului se dovedește a fi conectată în direcția înainte, deoarece este în esență conectat în paralel cu joncțiunea p-p - emițător Pentru /k = și /v =f= Găurile sunt injectate din emițător, ceea ce asigură că concentrația lor în apropierea colectorului din bază depășește valoarea de echilibru Dacă concentrația purtătorilor de sarcină minoritari în baza de lângă joncțiunea p-n o depășește pe cea de echilibru, atunci aceasta corespunde includerii directe a tranziției Astfel, tranzistorul funcționează în modul de saturație cu o tensiune de colector egală cu zero și chiar cu o tensiune mică de blocare pe colector în raport cu emițătorul Valoarea acestei tensiuni determină rezistența de saturație a tranzistorului (vezi §) Această tensiune este afectată de raportul căderilor de tensiune la joncțiunile emițătorului și colectorului, rezistența de volum a colectorului și rezistența de bază Pe rezistența de volum a colectorului, la trecerea curentului, se creează o cădere de

tensiune, direcționată astfel încât deschide colectorul Prin urmare, tensiunea la ieșirea externă a colectorului, corespunzătoare ieșirii tranzistorului din modul de saturație, crește Curenții din baza tranzistorului sunt direcționați astfel încât căderea de tensiune pe care o creează blochează părțile joncțiunilor emițătorului și colectorului care sunt cele mai îndepărtate de terminalul de bază (vezi §) Ca rezultat, chiar și atunci când partea de mijloc a joncțiunii colectorului este deja blocată, regiunile sale periferice rămân deschise și curentul trece prin ele către ieșirea de bază (vezi Fig , a) Ca rezultat, curentul emițătorului este închis nu prin terminalul colector extern, ci prin regiunea colectorului și terminalul de bază Acest fenomen duce, de asemenea, la o creștere a tensiunii, la care tranzistorul iese din saturație Intervalul acestor valori ale tensiunii colectorului este mai mare, cu atât este mai mare curentul de bază În consecință, ieșirea statică, caracteristicile tranzistorului într-un circuit cu un emițător comun la tensiuni joase pe colector și când / în \u d F O intră în al patrulea cadran Când se modifică direcția curentului de intrare (bază), adică atunci când polaritatea tensiunii constante de pe bază se modifică în raport cu emițătorul, valoarea curentului emițătorului scade, ceea ce duce la o scădere a coeficientului de transfer al curentului emițătorului În consecință, coeficientul de transfer al curentului emițătorului a atins unitatea la tensiuni ridicate ale colectorului, secundar ~oti O Caracteristicile tranzistorului Teristicile transmisiei curentului ra, conectat conform schemei cu un tranzistor conectat printr-un emițător comun, cu tensiuni mari pe colector cu un emițător comun decât Ikeprob corespunzător lui /v= În aceste condiții, defalcarea tranzistorului are loc la tensiuni mai mari decât Ikeprob dar fără a depăși Ikvoprob · Cu toate acestea, după ce se produce defecțiunea, curentul prin joncțiunea emițătorului crește semnificativ, ceea ce este motivul creșterii coeficientului de transfer al curentului emițătorului Acum, pentru a continua- creșterea durabilă a curentului colectorului, adică pentru a îndeplini condiția D v \u d , puteți reduce factorul de multiplicare M prin reducerea tensiunii la colector În acest caz, coeficientul de transfer al curentului emițătorului rămâne egal cu unitatea, deoarece curentul emițătorului crește Astfel, pe caracteristicile statice apar secțiuni cu rezistență diferențială negativă (Fig) Caracteristicile transferului de curent Familia caracteristicilor de transfer static de curent ale unui tranzistor conectat conform unui circuit emițător comun este prezentată în fig Natura generală a acestor dependențe indică faptul că în tranzistorul /k = Dkeo + D e / v Datorită dependenței mai mari a coeficientului de transfer de curent al bazei D e de modul de funcționare al tranzistorului, în comparație cu dependența similară a coeficientului de transfer CC al emițătorului, caracteristicile transferului de curent într-un circuit cu un emițător comun sunt mai ne- liniar - Deplasarea în sus a caracteristicilor statice ale transferului de curent odată cu creșterea tensiunii colectorului este, de asemenea, mai semnificativă în comparație cu schimbarea caracteristicilor similare ale circuitului cu o bază comună, deoarece în acest caz nu este asociată cu o scădere a recombinării găurilor cu o scădere a grosimii bazei, ci cu o creștere a curentului emițătorului la o bază constantă actual (vezi Fig ,) Când Ike \u d; LO, caracteristicile transferului de curent nu ies din originea coordonatelor, dar din puncte de pe axa y corespunzătoare caracteristicilor fkeo-feedback ale curenților Familia caracteristicilor de feedback static ale unui tranzistor conectat

conform unui circuit emițător comun este prezentată în fig Natura generală a acestor dependențe poate fi găsit analizând orez , sau o simplă reconstrucție grafică a familiei de caracteristici statice de intrare ale circuitului cu un comun emițător Compensarea caracteristicilor statice Feedback-ul ascendent cu o creștere a curentului de bază, de asemenea, nu necesită o explicație specială De mai mult interes sunt Fig Caracteristicile statice caracteristice statice ale circuitului cu caracteristici comune de feedback ale emițătorului, deoarece indică valorile curenților de bază ai tranzistorului conectat Pentru un circuit cu un emițător comun circuite cu o bază comună, curentul de bază nu se modifică este determinată și este imposibil să-l determine din curenții emițătorului și colectorului cu suficientă precizie, deoarece curenții emițătorului și colectorului diferă puțin § FUNCȚIONAREA UNUI TRANZISTOR PE UN SEMNAL DE CA MIC Să luăm în considerare mai detaliat factorii care afectează funcționarea unui tranzistor, cu condiția ca, pe lângă tensiunile constante, joncțiunile acestuia să fie aplicate mici tensiuni alternative În același timp, prin tranzistor trec curenți continui și alternativi mici Prin tensiuni și curenți alternativi mici îi vom înțelege pe cei la care legătura dintre ele rămâne liniară După cum s-a menționat în § , atunci când un tranzistor funcționează pe un semnal variabil mic, proprietățile sale sunt determinate de procesele de transfer, acumulare și resorbție a purtătorilor, precum și de reordonarea capacităților de joncțiune Pentru a considera acest lucru mai detaliat, imaginați-vă că un semnal trece prin elementele individuale ale tranzistorului sub forma unui mic impuls de curent dreptunghiular sau a unui mic pachet subțire de purtători de sarcină Capacitatea de barieră a emițătorului Lasă un impuls de curent dreptunghiular să treacă prin circuitul emițător al unui tranzistor conectat într-un circuit de bază comun Pe baza principiului de funcționare al tranzistorului, pentru a obține amplificare, purtătorii de sarcină trebuie injectați în bază, ceea ce necesită o modificare a tensiunii la joncțiunea emițătorului Cu toate acestea, datorită faptului că joncțiunea emițătorului are o capacitate de barieră Ce bar și lanțul in care este inclusa, cu o rezistenta finita, tensiunea la jonctiunea emitatorului nu se va modifica instantaneu; înseamnă că nu emițător sti: a - calea componentei de curent capacitiv; b-forma pulsului de curent şi tensiune pe emițător curs (concentrația la limită a purtătorilor de sarcină minoritari în baza de lângă joncțiunea emițătorului) Orez Distorsiunea semnalului la trecerea purtătorilor de sarcină minori prin baza tranzistorului: a - structura schematica tranzistor; b - mișcare pa- purtători de taxe minoritare în bază; in - impulsuri ale curentilor injectia purtătorilor de sarcină se modifică și ea instantaneu (Fig) Astfel, prezența capacității emițătorului duce la faptul că injectarea purtătorilor în bază încetinește, așa cum ar fi, și dacă semnalele urmează una după alta la intervale de timp comparabile cu această decelerare, pachetele corespunzătoare de purtători de sarcină injectate fuzionează Acesta este primul motiv pentru distorsiunea semnalelor de înaltă frecvență Zborul purtătorilor de taxe prin bază Imaginați-vă că din partea emițătorului, un pachet de purtători de sarcină injectați intră în bază (Fig) Acești purtători încalcă neutralitatea bazei și un număr adecvat de purtători principali trebuie să intre în ea de la contactul nerectificator Acest lucru se întâmplă destul de repede - în timpul relaxării dielectrice Prin urmare, un impuls de curent egal cu ei trece prin ieșirea de bază * impuls de curent emițător Apoi, pachetul de transport începe să se deplaseze în bază spre colector Dacă purtătorii

din bază nu se recombină și câmpul este neschimbat acolo, cu o astfel de mișcare nu există curent în toți electrozii tranzistorului, deoarece sarcina injectată în bază este neutralizată În timpul mișcării prin bază, un pachet de purtători de încărcare este spălat din cauza difuziei Într-adevăr, prezența gradienților de concentrație duce la faptul că purtătorii de sarcină situati la marginea anterioară a unui astfel de pachet îl depășesc și rămân în urmă la marginea de fugă, iar un pachet purtător deja neclar se apropie de colector Decolorarea pachetului purtător de sarcină este sporită de faptul că aceștia parcurg căi diferite în tranzistor datorită neparalelismului joncțiunilor pn emițător și colector Acest fenomen este deosebit de pronunțat este situat la marginile emițătorului / (Când pachetul media ajunge la al joncțiunea colectorului, purtătorii de sarcină minoritari sunt extrași din bază, neutralitatea sa electrică încălcat; prin urmare, principala p transportatorii părăsesc, de asemenea, baza Dacă recombinarea nu ar avea loc în bază, sarcina care părăsește baza ar fi egală cu cea de intrare, adică valoarea medie a curentului de bază ar fi egală cu x zero Cu toate acestea, un curent alternativ curge prin terminalul bazei, asociat cu o modificare a sarcinii purtătorilor din bază Deoarece recombinarea are loc în bază, sarcina care o părăsește este de mai multe) aproximativ mai puțin decât intrarea, ceea ce dă unele a doua valoare diferită de zero a mediei Distorsiunea semnalului curent de bază, la trecerea purtătorilor Când timpul de zbor al purtătorilor de sarcină prin încărcătura colector prin baza Iprol se dovedește a fi o structură colector mare, mărește, de asemenea, întinderea impulsului Apoi, dacă zonele de semnal; b - repartizarea purtătorilor în colector re-reprezintă următorul-pulsuri numărare-stroke; c - curentul impulsurilor, acestea încetează să fie diferite (/ - fără a lua în considerare bariera în curentul colectorului Aceasta este a doua capacitate a joncțiunii colectorului; - luând în considerare supraîncărcarea, cauza distorsiunii de înaltă frecvență și capacitatea de barieră a semnalelor colectorului de către tranzistor tranziție spinoasă) Zborul purtătorilor prin regiunea de încărcare spațială a colectorului Să luăm în considerare modul în care apare curentul în circuitul colectorului atunci când un pachet de purtători de sarcină intră în regiunea de încărcare spațială a joncțiunii colectorului (Fig) Natura curentului care trece în acest caz este că purtătorii care au intrat în regiunea încărcăturii spațiale distorsionează distribuția câmpului electric în ea O modificare a câmpului electric duce la apariția curenților de deplasare, care sunt închise prin circuitul colectorului O astfel de modificare a câmpului electric și, prin urmare, trecerea curentului în circuitul colector, are loc atâta timp cât purtătorii se află în regiunea sarcinii spațiale (vezi §) Prin urmare, durata Intensitatea impulsului de curent în circuitul colector este determinată de timpul de zbor al purtătorilor de sarcină prin joncțiunea pn a colectorului (Fig , c) Daca semnalele urmeaza cu intervale de timp mai scurte decat timpul de zbor prin jonctiunea pn a colectorului, ele se dovedesc a nu se distinge Acesta este al treilea motiv al distorsiunii semnale de înaltă frecvență de către un tranzistor Capacitatea de barieră a joncțiunii colectorului Raționamentul de mai sus s-a bazat pe presupunerea că, de îndată ce purtătorii de sarcină intră în joncțiunea colectorului, un curent apare imediat în circuitul colectorului Cu toate acestea, acest curent, după cum sa menționat, poate apărea dacă câmpul electric din joncțiunea pn a colectorului se modifică Dar, deoarece joncțiunea ~ colector are o anumită capacitate, iar circuitele în care este inclusă au o

rezistență, apariția unui curent nu are loc instantaneu - în primul rând, trebuie să aibă loc o modificare a sarcinii capacității de barieră a joncțiunii Acest lucru duce, de asemenea, la distorsiunea semnalului (Fig , c) Astfel, funcționarea tranzistorului pe un semnal alternativ este determinată atât de trecerea curenților activi, asemănătoare ca natură fizică cu curenții continui, cât și de trecerea curenților capacitivi asociate cu prezența capacităților de barieră și acumularea de sarcini în bază Toate aceste fenomene sunt influențate de timpii de zbor ai purtătorilor de taxe În consecință, pentru un semnal variabil mic, tranzistorul este un element activ destul de complex al circuitului electric, ai cărui parametri se dovedesc a fi complexi și dependenți de frecvență § PARAMETRI DE SEMNAL SCĂZUT Dacă tensiunile alternative la joncțiunile tranzistorului sunt suficient de mici, curenții din acesta se dovedesc a fi funcții liniare ale acestor tensiuni Tranzistorul poate fi considerat ca un cvadripol liniar (Fig) În acest caz, două concluzii externe Consider un cvadripol: g VHO GI NYMI, curentul si tensiunea corespunzatoare acestora denota / si U, Celelalte două ieșiri sunt ieșite, curentul și tensiunea corespunzătoare acestora sunt notate cu i și U Direcția curenților care intră în rețeaua cu patru terminale este considerată pozitivă Pentru a arăta legătura dintre valorile și I , și / , compunem șase sisteme de ecuații Cu toate acestea, în practică sunt utilizate doar trei sisteme În prima dintre ele, tensiunile sunt considerate funcții liniare ale curenților: (J, = Zllil + Z Í ; } ( ) U = Z H + Z Coeficienții Z;k, care au dimensiunea rezistenței și sunt complexi, pot fi exprimați în termeni de curenți și tensiuni măsurate în modul inactiv, astfel: (,) Aici, ca în cele ce urmează, indicele (a se citi "unu-unu") înseamnă parametrul de intrare (care caracterizează circuitul de intrare), indicele ("unu-doi") este parametrul de feedback, indicele ("două-unu") ") -parametrul transmisiei directe și indicele ("două- doi") este un parametru de ieșire Pentru a obține un mod inactiv, în circuit este inclusă o rezistență lenie, mult mai mare decat rezistenta corespunzatoare che-Fig Quadripol, ek-tripol (intrare sau ieșire vivace la tranzistor) La determinarea experimentală a parametrilor unui tranzistor, este necesar să se alimenteze electrozii acestuia cu o tensiune constantă fie printr-o rezistență activă foarte mare de la o sursă de energie suficient de înaltă, fie prin elemente inductive Implementarea unui mod inactiv în emițătorul sau circuitul de bază (pentru un circuit cu un emițător comun) nu este dificilă, deoarece rezistența internă a joncțiunii deschise este mică și crearea unui mod inactiv în circuitul colector (ieșire) este dificil deoarece rezistența internă în acest caz este foarte mare (până la câțiva megaohmi) Prin urmare, este dificil să se determine experimental parametrii z ai unui tranzistor Dacă curenții tranzistorului sunt considerați funcții liniare ale tensiunilor, obținem un sistem de ecuații: i, = Y (J, + Y U ; } (,) I = Y U + Y U Coeficienții y;k, care au dimensiunea conductibilității și sunt de asemenea complecși, se determină în modul scurtcircuit: (,) Obținerea unui mod de scurtcircuit constă în faptul că circuitul studiat este șuntat cu o rezistență mult mai mică decât rezistența internă a circuitului corespunzător Având în vedere necesitatea de a furniza energie electrozilor tranzistorului cu o tensiune constantă, o astfel de manevră se poate face cu o capacitate Modul de scurtcircuit poate fi implementat cu ușurință în circuitul colector, unde rezistența internă a tranzistorului este mare Implementarea modulului de scurtcircuit în circuitul emițător este dificilă, mai ales în regiunea de joasă frecvență Acest lucru limitează

utilizarea parametrilor y pentru descrierea proprietăților unui tranzistor Pentru a evita aceste dificultăți, cel mai adesea, așa-numita amestecare este folosită pentru a descrie proprietățile unui tranzistor sistemul u , = h, ~ + hl ~ ; } (,) = h fl + h H Pentru a determina parametrii h, este necesar un mod de scurtcircuit în circuitul de ieșire și un mod inactiv în circuitul de intrare Semnificația fizică a parametrilor h este destul de simplă: hll = , ! f,-ln,=o -impedanța de intrare în caz de scurtcircuit- nii circuit de iesire; - coeficientul de feedback al tensiunii la ralanti în circuitul de intrare; - coeficientul de transfer de curent în caz de scurtcircuit al circuitului de ieșire; -conductanta de iesire la ralanti in circuitul de intrare Avantajele parametrilor h sunt comoditatea determinării lor experimentale În plus, parametrii h sunt măsurați în moduri apropiate de cele ale tranzistorilor din circuitele practice Cu toate acestea, pentru calcularea circuitelor electrice este adesea mai convenabil să folosiți alți parametri (de exemplu, U) Trecerea de la un sistem de parametri la altul este destul de simplă În acest scop, ecuațiile sistemului din care este o tranziție, ar trebui să se decidă asupra cantităților care sunt funcții în sistemul la care se face tranziția Coeficienții obținuți la curenți sau tensiuni vor da formulele de tranziție De exemplu, dacă trebuie să comutați de la subiecte cu parametrii y la sistemul Z! Parametrii, ecuațiile ( ) trebuie rezolvate în raport cu I și I (funcții în sistemul z) Expresiile rezultate arată astfel: ( ) U = -, !:d il + Ш I , Lu Lu unde Lu = U U -y U este determinantul sistemului y Comparând sistemul ( ) cu ( ), obținem relații pentru trecerea de la un sistem de parametri la altul Formulele găsite într-un mod similar sunt rezumate în tabel Tabelul a Formule de tranziție între sisteme de parametri Z lyl Ihl /z/ Z Z Y Y -l;- ; în U -l; l; /u/ U U /h/ Jlz Z Z Z U Valorile parametrilor tranzistorului, prezentați sub forma unei rețele cu patru terminale, depind de schema de includere a acestuia Cu toate acestea, dacă acești parametri sunt cunoscuți pentru orice schemă, este relativ ușor de recalculat pentru alta Pentru a face acest lucru, este necesar să se schimbe tensiunile și curenții (având sub forma unei reguli de semne), având în vedere că în tranzistor adică + j + jK = ; (,) (,) După ce au făcut substituțiile necesare și am transformat ecuațiile, obținem formulele de tranziție ca coeficienți în ecuații De exemplu, cunoaștem parametrii y ai unui tranzistor pentru un circuit cu o bază comună, dar doriți să îi găsiți pentru un circuit cu un emițător comun, în ecuații i, \u d UUbDzb + Y b (Dkb; ( ) jK \u d Y bizb + U b (Dkb ( ) înlocuim curenții și tensiunile folosind expresiile ( ) și ( ) După transformări, obținem j + U = (Y) + U + U) (Dbz -(U + U b)ukz, (,) (,) unde Ob = -O b Prin urmare, Y z \u d Y + Y + Y + Y ; Y z \u d -(Y + Y b); (,) Y z \u d -, (y b + Y); Y z = Y · Relații similare sunt derivate pentru alți parametri § CIRCUIT ECHIVALENT Considerarea unui tranzistor ca un activ liniar cu patru poli (vezi §) este convenabilă pentru calcularea circuitelor electrice Cu toate acestea, are și o serie de dezavantaje, care sunt legate în primul rând de faptul că parametrii cvadripolului sunt introduși formal într-o anumită măsură și fiecare dintre ei poate reflecta influența mai multor procese fizice simultan Prin urmare, se obțin dependențe complexe ale parametrilor cvadripolului de modul de funcționare al tranzistorului (tensiuni și curenți constante), de frecvență și temperatură Pentru a simplifica aceste dependențe, proprietățile unui tranzistor cu un semnal variabil mic sunt descrise folosind circuite echivalente Prin echivalent se înțelege un circuit electric compus din elemente liniare

ale circuitelor electrice (rezistențe, capacități, inductanțe, generatoare de curent sau de tensiune), care nu diferă în proprietățile sale pentru un semnal dat (de exemplu, cu o variabilă mică) de un obiect real (tranzistor) Reprezentarea grafică a circuitelor echivalente vă permite să fixați mai economic relațiile principale Când calculați folosind circuite echivalente, mai întâi determinați curenții și tensiunile din circuit și apoi treceți la alți parametri, de exemplu, parametrii unui cvadripol Niciun circuit echivalent al unui număr finit de elemente nu poate fi complet echivalent cu un tranzistor real, adică toate echivalente diagramele sunt aproximative Cu cât circuitul echivalent este mai simplu, cu atât conține mai puține elemente polițiști, cu atât este mai ușor de utilizat, dar, de obicei, reflectă mai puțin precis proprietățile unui tranzistor real După metoda de construcție, se disting circuitele echivalente formale și fizice Circuitele echivalente formale sunt construite pe baza descrierii tranzistorului folosind ecuațiile cvadripolare (Fig) După cum se poate observa din figură, fiecare circuit conține patru elemente: două rezistențe (complexe) și două generatoare de curent sau tensiune Astfel de circuite echivalente au nr avantaje față de descrierea tranzistorului ca fiind patru j g -C: : : J ÌC: : : : : J- Um=i,rz ,-zl) z =z, OutIn Out Bx L U Out Bx Bx Off) Noi : pentru sistemul de parametrii y; c - pentru a - sistem de circuit echivalent în formă de T de parametrii h ma cu un generator EMF; b - circuit echivalent în formă de T cu generator de curent; c -Circuit echivalent în formă de P cu un generator de curent al unui re-pol prin setarea parametrilor acestuia (sau ecuațiile corespunzătoare) Circuitele echivalente formale pot fi reprezentate sub diferite forme: de exemplu, pot fi construite astfel încât să existe un singur element activ în circuit (Fig) De obicei, aceste scheme sunt împărțite în formă de T și U conform metodei de desen Pentru a stabili legătura dintre elementele circuitelor formale cu un singur generator și parametrii unui cvadripol, se pot scrie expresii pentru curenți și tensiuni în ele, apoi le pot compara cu valorile curenților și tensiunilor unui cvadripol De exemplu, pentru un circuit echivalent în formă de T cu un generator EMF (Fig , a) în modul inactiv la ieșire) Ui = (J = (zi + Z) , \ (J τ + j IZ , f (,) în regim de repaus la admisie J = i z , U = i (z + zs) }(,) De aici J + Jm J + T = = Z τ=Z ; fi = = ZI Z = ZII; (,) ~ = Z = Z ; (J = Z + Z = Z - J = = După transformare, obținem valorile indicate în figură Parametrii altor generatoare unice se obțin în mod similar scheme rupte Circuitele echivalente fizice se bazează pe considerații fizice pentru anumite tipuri de structuri tranzistor, pentru un anumit domeniu de frecvență, concentrându-se pe un anumit circuit de comutare a tranzistorului (cu un emițător comun, o bază comună, un colector comun) Fiecare ieșire a circuitului echivalent fizic corespunde unui electrod al tranzistorului Rețineți că în circuitele echivalente formale, se disting numai bornele de intrare și de ieșire, indiferent de electrozi de tranzistor Un circuit echivalent fizic este construit prin evidențierea mentală a unor părți dintr-un tranzistor și luând în considerare separat procesele din aceste părți Construcția se bazează de obicei pe circuitul echivalent formal al unui tranzistor idealizat, numit model teoretic unidimensional Când se studiază un model teoretic unidimensional al unui tranzistor, se crede că purtătorii de sarcină intră se deplasează pe căi paralele, iar recombinarea suprafeței modifică doar durata de viață a purtătorului În plus, modelul teoretic unidimensional nu ține cont de influența rezistențelor de volum și a curenților care trec prin capacitățile de

barieră ale joncțiunilor În cadrul unor astfel de ipoteze, se dovedește că parametrii unui circuit echivalent formal sunt pur și simplu exprimați în termeni de parametrii de proiectare ai unui tranzistor idealizat (grosimea bazei), modul său de funcționare și proprietățile materialului La modelul teoretic unidimensional al tranzistorului se adaugă elemente care iau în considerare alte procese, de exemplu, căderile de tensiune pe rezistențele în vrac, curenții prin capacități etc d § ti CIRCUIT ECHIVALENT AL MODELULUI TEORETIC UNIDIMENSIONAL După cum sa menționat mai sus, parametrii unui circuit echivalent formal pot fi exprimați cu ușurință în ceea ce privește parametrii unei rețele cu patru terminale, care, la rândul lor, pot fi găsiți din valorile lui curenti si tensiuni in tranzistor Prin urmare, pentru a construi un circuit echivalent formal al unui model teoretic unidimensional al unui tranzistor, este necesar să se cunoască componentele variabile ale curenților și tensiunilor Calculul riguros al acestor componente se realizează aproape în același mod ca și calculul componentelor constante (vezi §) Cu toate acestea, este mai complicat, deoarece în acest caz presupunerea unei densități constante de curent în toate secțiunile bazei este mai puțin justificată, acest lucru este pronunțat în special în regiunea de înaltă frecvență Pentru calcule suplimentare, vom folosi o metodă simplificată Ținând cont de faptul că toți parametrii circuitului echivalent formal sunt complecși, îi vom prezenta ca rezultat al rezistența de conectare în paralel ny și capacități Circuitul echivalent rezultat este prezentat în fig Acest circuit echivalent ar trebui să fie valabil în regiunea de joasă frecvență Apoi, rezistențele active ale circuitului echivalent pot fi obținute ca raport dintre creșterile de tensiune din circuitele tranzistorului și creșterile de curent care le-au provocat (astfel de creșteri joacă rolul de semnale variabile la frecvențe joase) Conform circuitului echivalent, rezistența emițătorului) bieb lr = di ÍK=const bieb \ - bik I3 = const' ( ) Orez Circuit echivalent Ma rezistența teoretică a colectorului unidimensional a modelului tranzistorului: a - cu rezistente complexe; b - cu activ r , , k ~ bikb bik Í =const' (,) rezistențe și capacități de difuzie rezistența de difuzie a bazei Gv; f \u d bieb ld- - ; (,) Ik e=SOPZ coeficientul de transfer al curentului de emițător al unui model teoretic unidimensional al unui tranzistor sik a=- - (,) dt UK =const Capacitatele din circuitul echivalent al modelului teoretic unidimensional reflectă doar acumularea de purtători de sarcină în bază Capacitate de difuzie ale tranzistorului - Q Cu bdif -, (,) du, i =const (bikb beeb } ( ) Sk diff = - adică=const Valabilitatea relațiilor ( ) -( ) se păstrează până la frecvențe, când perioada semnalului începe să se apropie de timpul de zbor al purtătorilor de taxe prin bază Să luăm în considerare ce procese pe baza unui model teoretic unidimensional al unui tranzistor determină valorile parametrilor circuitului său echivalent Generatorul de curent din circuitul colector ia în considerare, așa cum este indicat, proprietatea activă a tranzistorului Valoarea actuală a acestei gene ratorul este proporțional cu valoarea curentului emițătorului și depinde de frecvență În acest caz, atât amplitudinea, cât și faza curentului se modifică Dependențele de frecvență ale lui a sunt considerate în detaliu în § , aici ne limităm la studierea valorii sale de joasă frecvență a Folosind expresiile pentru curenții de tranzistor (vezi §), folosind formula ( ), puteți găsi valoarea lui a Pentru a ști ce procese determină valoarea lui a, acesta este reprezentat ca un produs al patru factori: a \u d yapa * M, ( ) unde y \u d ddi: p este eficiența emițătorului, arătând, adică UK \u d const

care este proporția purtătorilor de sarcină injectați în bază în curentul total al emițătorului (valoarea lui y este de obicei puțin mai mică decât unitatea); ai,=-d dÌKp - arată coeficientul de transfer • ka- rem icb = const part purtătorii de sarcină injectați în bază ajung la joncțiunea colectorului (valoarea lui al este de obicei puțin mai mică decât d ' unități; a =-d~-l este randamentul colectorului, în timp ce M=I care determină de câte ori crește curentul colectorului datorită prezenței unei componente în curentul invers al joncțiunii colectorului care depinde de curentul emițătorului (valoarea unui * este de obicei puțin mai mare decât unu sau egală cu unu); ,M - coeficientul de înmulțire a avalanșelor (vezi §) Eficiența colectorului a* ia în considerare fenomenul asociat cu o modificare a extragerii purtătorilor minoritari din regiunea colectorului: cu creșterea curentului emițătorului și, în consecință, a curentului colectorului, scăderea de tensiune pe rezistența de volum a colectorului regiunea crește, ceea ce contribuie la deplasarea purtătorilor minoritari ai regiunii colectoare către joncțiunea colectorului Ca rezultat, pe măsură ce curentul emițătorului crește, curentul colectorului crește nu numai datorită trecerii purtătorilor injectați de emițător prin joncțiunea colectorului, ci și datorită extragerii purtătorilor de sarcină minoritari din părți mai îndepărtate ale regiunii colectoare În practică, a* > numai în tranzistoarele cu germaniu cu o regiune colectoare de înaltă rezistență La tranzistoarele de siliciu, a * ~ , deoarece curentul invers prin joncțiunea pn de siliciu se datorează în principal generării termice a purtătorilor în joncțiunea pn în sine, și nu extracției purtătorilor de sarcină minori Relaţiile generale derivate mai devreme ne permit să obţinem toţi factorii ( ) - parametrii interni ai tranzistorului Pentru tranzistor fără deriva (,) (,) a*~ ( ) Coeficientul de transfer de curent al bazei modelului teoretic unidimensional al tranzistorului ~ dÍK a (,) = di UK =const ~~· Egalitatea ( ) este aproximativă, întrucât determinarea coeficienților de transfer ai curentului emițătorului a și curentului de bază ~ se realizează în condiții oarecum diferite: ukb= const și u·· = const Parametrii circuitului echivalent al unui model teoretic unidimensional al unui tranzistor a și ~ pot fi exprimați cu ușurință în termenii parametrilor unei rețele echivalente cu patru terminale, adică în termenii parametrilor unui tranzistor real: (,) (,) Aceste egalități sunt, de asemenea, aproximative, deoarece au fost făcute o serie de ipoteze pentru modelul teoretic unidimensional al tranzistorului (vezi §) Semnele coeficienților de transfer al curentului emițătorului ai modelului teoretic unidimensional al tranzistorului și al tranzistorului real ( ) sunt diferite din cauza diferenței de direcție curenți într-un tranzistor real conectat conform unui circuit de bază comun și direcții acceptate convențional ale acelorași curenți într-o rețea echivalentă cu patru terminale rezistența emițătorului Dacă y \u d , atunci rezistența emițătorului Γ \u d kT (-Iprol) (,) e / wwq e s dx s N dx o N o Dp Pentru un tranzistor fără deriva, folosind relațiile din § , obținem kT ( ) Ge = p e · Pentru un tranzistor de deriva cu un câmp constant în regiunea de bază N (O) (N (w))] Ge \u d kT [I N (w) p -; : ; c;) N(O} ~ !! I q/ N( ) (N(w)) q/e -N( ) (,) Astfel, rezistența emițătorului unui tranzistor fără deriva este mai mică decât cea a unui tranzistor cu deriva, aproximativ de două ori Acest lucru se datorează faptului că rezistența emițătorului este fără deriva tranzistoarele reflectă nu numai modificarea curentului emițătorului cu o schimbare a tensiunii, ci ia în considerare și efectul de modulare a grosimii bazei În

tranzistoarele cu deriva, curentul emițătorului este determinat în mare măsură de câmpul electric; prin urmare, rolul modulării grosimii bazei este mai mic în acest caz Capacitatea de difuzie a emițătorului În mod similar, capacitatea de difuzie a emițătorului se găsește: cu , , ql t (,) e diff kT prol Rezistența la difuzie a bazei Calculul dă kT Tr Diferența GB (,) ql (' dx rN jj-dX Oh, nu, dp Pentru tranzistor fără deriva L kT gb dif=- - (,) ~~g , con EV Diferența de potențial de contact de la ( ) kT I pporro ffih și apoi utilizați raportul ( ) Grafic, dependența coeficienților de transmisie de frecvență este prezentată în fig Graficul arată că lh e scade la frecvențe mult mai mici decât lh I Din punct de vedere fizic, acest lucru se datorează influenței defazajului dintre curenții emițătorului și colectorului (Fig) Odată cu creșterea frecvenței, defazarea crește, iar acest lucru duce la o creștere a curentului de bază, chiar dacă curentul curentul colectorului și al emițătorului sunt neschimbați în valoare absolută Prin urmare, și ( ) scade Câștig de putere la frecvențe înalte Pe măsură ce frecvența semnalului crește, câștigul de putere al tranzistorului scade Acest lucru se datorează atât unei scăderi a câștigului de curent, considerată mai devreme, cât și influenței circuitului GB Sk bar il Orez Diagrame vectoriale ale curenților tranzistorilor la frecvente diferite Odată cu creșterea frecvenței, efectul de manevră al acestui circuit asupra sarcinii crește, un curent mai mic se ramifică în sarcină, ceea ce duce la o scădere a câștigului de putere (Fig) Pentru a combate acest fenomen, Orez Circuitul colector pentru a alege o anumită rezistență a tranzistorului (pentru o sarcină variabilă, adică pentru a se potrivi cu sarcina, componenta curentă) Cu toate acestea, la frecvențe foarte înalte, acest lucru nu face posibilă obținerea unui câștig suficient conform putere La o anumită frecvență, câștigul de putere al tranzistorului, chiar și cu o sarcină potrivită, devine egal cu unu Aceasta înseamnă că tranzistorul la această frecvență nu mai poate fi considerat ca un element activ al circuitului electric Cu un câștig de putere egal cu (sau mai mic decât) unitate, este imposibil să implementați un mod de autoexcitare într-un generator de tranzistori Prin urmare, frecvența la care câștigul de putere devine egal cu unitatea se numește frecvența maximă de generare Calculul arată că frecvența maximă de generare poate fi găsită din formula fmax = VB /ζ ~τρ (J) Frecvența maximă de generare caracterizează cu cel mai mare succes proprietățile de frecvență ale tranzistorului, deoarece determină domeniul de frecvență în care tranzistorul rămâne un element activ al circuitului electric § FUNCȚIONAREA UNUI TRANZISTOR PE PULSURI Caracteristici de lucru Tranzistorii sunt adesea folosiți în dispozitivele cu impulsuri și ca comutator de tranzistori Atunci când un tranzistor este utilizat în dispozitive cu impulsuri, de obicei este necesar să se reproducă nedistorsionat impulsul amplificat la ieșire Funcționarea unui tranzistor la amplificarea semnalelor pulsate mici nu este în principiu diferită de funcționarea unui tranzistor la amplificarea semnalelor sinusoidale mici Pulsul poate fi reprezentat ca o sumă a unui număr de componente armonice și, cunoscând proprietățile de frecvență ale tranzistorului, determină distorsiunea formei impulsului care poate apărea în timpul amplificării Funcționarea tranzistorului în timpul amplificării semnalelor mari pulsate este împiedicată de faptul că tranzistorul în acest caz poate fi nu numai în modul activ, ci și în modurile de tăiere și saturație Când un tranzistor funcționează ca un comutator de tranzistor, este necesar ca rezistența tranzistorului la ieșire, adică în circuitul de sarcină, să se modifice brusc sub

influența impulsului de control de intrare Pentru a face acest lucru, amplitudinea impulsurilor de intrare trebuie să fie suficientă pentru a transfera tranzistorul din modul de tăiere în modul activ de funcționare și apoi în modul de saturație, precum și în direcția opusă Schema cu o bază comună Luați în considerare procesele care au loc într-un tranzistor conectat conform unei scheme cu o bază comună, atunci când un impuls de curent de durată Dimp trece prin emițător în direcția înainte, urmat de o schimbare a direcției sale spre opus (Fig) În starea inițială, tranzistorul este în modul de întrerupere, adică joncțiunile emițătorului și colectorului sunt polarizate în direcția opusă După aplicarea unui impuls de curent prin emițător în direcția înainte, curentul colectorului nu apare imediat, deoarece este nevoie de ceva timp pentru a reîncărca capacitățile de barieră ale emițătorului și joncțiuni colectoare, precum și mișcarea purtătorilor de sarcină minoritari injectați către joncțiunea colector (Fig ,) Intervalul de timp dintre momentul în care un impuls de curent este aplicat la intrarea tranzistorului și momentul în care curentul de ieșire atinge o valoare corespunzătoare cu % din amplitudinea acestuia se numește timp de întârziere pentru tranzistorul biopolar Dzd În continuare, procesul de reîncărcare a capacitatea de barieră a joncțiunii emițătorului continuă, ceea ce duce la o creștere a tensiunii la joncțiunea emițătorului, la o creștere a concentrației limită și a gradientului de concentrație a purtătorilor de sarcină minoritari în baza de lângă joncțiunea emițătorului (Fig , c) O creștere a gradientului de concentrație al purtătorilor de sarcină minoritari în apropierea joncțiunii emițătorului corespunde unei creșteri a injecției-f 'n~) 'Rpo-o wx Rp ik Ly'JJ/UIQC ">' KLOS WX Orez Dependențe de timp ale curentului emițătorului (a) și curentului colectorului ( ) atunci când tranzistorul funcționează ca o cheie în funcție de circuitul de bază comun și distribuția purtătorilor de sarcină minori în bază la momente diferite: (c, d) componenta cationică a curentului emițătorului Componenta capacitivă a curentului emițătorului scade pe măsură ce capacitatea de barieră a joncțiunii emițătorului este încărcată, astfel încât curentul total al emițătorului / ei rămâne neschimbat (Fig , a) Valoarea sa este determinată de parametrii generatorului de curent din circuitul de intrare al tranzistorului Datorită creșterii componentei de injecție a curentului emițătorului, are loc procesul de acumulare a purtătorilor de sarcină minori în baza tranzistorului De asemenea, acest proces nu are loc instantaneu, deoarece viteza de mișcare a purtătorilor de sarcină minoritari în bază este finită În procesul de acumulare a purtătorilor de sarcină minoritari, gradientul concentrației lor în apropierea joncțiunii colectorului crește, ceea ce corespunde unei creșteri a curentului colectorului Pentru valori mari ale curentului emițătorului /ei, curentul colectorului este limitat nu de curentul emițătorului, ci de parametrii circuitului colectorului de ieșire Emițătorul injectează în bază o astfel de cantitate de purtători de sarcină minori încât joncțiunea colectorului nu poate extrage pentru o anumită valoare a rezistenței de sarcină și EMF a sursei de alimentare din circuitul colectorului Prin urmare, în baza tranzistorului din apropierea joncțiunii colectorului, concentrația la limită a purtătorilor de sarcină minoritari începe să crească Când această concentrație la limită a purtătorilor de sarcină minoritari depășește valoarea concentrației de echilibru a purtătorilor de sarcină minoritari, tranzistorul va comuta din modul activ în modul de saturație În acest moment (curba din Fig , c) curent de colector Dknas

~ /JkB/Rh ( ) În realitate, valoarea curentului constant al colectorului tranzistorului, care se află în modul de saturație, este puțin mai mare decât valoarea curentului de saturație, calculat conform ( ), deoarece, pe lângă EMF-ul sursei de alimentare, trebuie să se ia în considerare și căderea de tensiune pe rezistența de volum de bază La trecerea prin curentul emițătorului, în direcția înainte, scăderea de tensiune pe rezistența în vrac a bazei, așa cum se poate observa în fig , trebuie adăugat la EMF al sursei de alimentare din circuitul colectorului: Slr / k \u d Dknas \u d (/ DkB + Lii) / Hn ( ) (> - I- Orez Explicaţie Intervalul de timp în timpul schimbării de tip pisică a curentului curent al colectorului crește de la la colector din cauza schimbării % din amplitudinea sa se numește timp polaritatea căderii de tensiune pentru un tranzistor bipolar asupra rezistenței de volum a bazei la schimbare ra DNR (vezi Fig , b) Intervalul de timp-direcție curent al emițătorului Modificarea, care este suma timpului de întârziere și a timpului de creștere, se numește timpul de pornire al tranzistorului bipolar În momentul schimbării direcției curentului emițătorului, are loc o modificare a polarității căderii de tensiune pe rezistența volumetrică a bazei (Fig) În acest caz, valoarea curentului de colector scade brusc, deoarece /k- (/DkB -LI)/Nn ( ) În același timp, începe procesul de resorbție a purtătorilor de sarcină minori acumulați în baza tranzistorului La început moment după schimbarea direcției curentului emițătorului, concentrațiile limită ale purtătorilor minoritari în bază lângă joncțiunile p-n ale emițătorului și colectorului sunt mari: depășesc valoarea concentrației de echilibru a purtătorilor minoritari Prin urmare, rezistența acestor tranziții pentru curenții inversi este foarte mică Valorile curenților inversi ale emițătorului și colectorului sunt determinate în principal de rezistențele din circuitele externe și EMF al surselor de alimentare Concentrațiile la limită ale purtătorilor minoritari în bază lângă joncțiunile p-n nu pot scădea instantaneu după comutarea intrării tranzistorului! până la zero Acest lucru ar corespunde gradienților de concentrație infinit de mari ai purtătorilor de sarcină minoritari în bază în apropierea joncțiunilor p-n și curenților infinit de mari, care practic nu se pot datora valorilor de rezistență finite în circuitele externe ale tranzistorului Până când, în procesul de resorbție, concentrațiile la limită ale purtătorilor de sarcină minoritari din bază lângă joncțiunile pn nu scad la zero, curenții inversi prin joncțiunile pn corespunzătoare vor rămâne constanti, adică curenții emițătorului și colectorului rămân neschimbați în timp ce tranzistorul este in saturatie După reducerea concentrațiilor la limită ale purtătorilor de sarcină minoritari din bază în apropierea tranzițiilor la zero, curenții emițătorului și colectorului vor scădea cu timpul, deoarece procesul de resorbție a purtătorilor de sarcină minoritari de la bază continuă și valoarea absolută a gradienților de concentrație ale purtătorii de sarcină minoritari în apropierea p-n-ului corespunzător scade -tranziții Schimbari in distribuția purtătorilor de sarcină minoritari la diferite momente ale procesului de resorbție este prezentată în fig , oraș Intervalul de timp dintre momentul în care un impuls de oprire este aplicat la intrarea tranzistorului și momentul în care curentul colectorului atinge un nivel predeterminat (de exemplu, , / kus) ' se numește timpul de disipare pentru un tranzistor bipolar ipac intervalul de timp dintre momentele de scădere a curentului de ieșire de la valoarea corespunzătoare la % amplitudinea acestuia, până la o valoare corespunzătoare la % din amplitudinea sa, se numește timpul de dezintegrare pentru tranzistorul bipolar isp (vezi Fig , b)

Intervalul de timp dintre momentul în care impulsul de blocare este aplicat la intrarea tranzistorului și momentul în care curentul colectorului atinge o valoare corespunzătoare cu % din valoarea sa de amplitudine se numește timpul de oprire al tranzistorului bipolar ioff Timpul de resorbție, timpul de cădere și, în consecință, timpul de oprire al tranzistorului depind de amplitudinea pulsului curentului de comutare directă al emițătorului, de EMF a sursei de alimentare și de rezistența de sarcină în circuitul colectorului, ca precum și asupra proprietăților de frecvență ale tranzistorului Creșteți viteza tranzistorului care funcționează ca Utilizarea unei chei electronice, adică pentru a reduce timpul de resorbție, se poate face prin introducerea de impurități ale capcanelor de recombinare (aur pentru siliciu) în cristalul semiconductor În acest caz, durata de viață a operatorilor minoritari de taxe va fi redusă Cu toate acestea, împreună cu o creștere a vitezei la astfel de tranzistori, în primul rând, vor exista mai puțini coeficienți de transfer de curent datorită recombinării mai intense a purtătorilor de sarcină minoritari în bază În al doilea rând, vor avea mai mult curent invers de colector și emițător datorită generării termice mai intense a purtătorilor de sarcină în joncțiunile colector și emițător pn, precum și în zonele adiacente acestor joncțiuni O metodă mai reușită pentru creșterea vitezei unui tranzistor care funcționează ca comutator electronic este manevrarea joncțiunii colectorului cu o diodă Schottky, în care, cu polarizarea directă, nu există injectarea purtătorilor de sarcină minori și acumularea lor Structura și principiul de funcționare a unui astfel de tranzistor cu o diodă Schottky vor fi discutate în § , deoarece astfel de tranzistoare sunt utilizate pe scară largă în circuitele integrate Schemă cu un emițător comun Într-un tranzistor conectat conform unei scheme cu un emițător comun, atunci când funcționează pe impulsuri cu o amplitudine mare, au loc aceleași procese de acumulare și resorbție a purtătorilor de sarcină minori în bază Pe fig arată dependențele de timp ale curentului de bază și curentului de colector atunci când tranzistorul este pornit într-un circuit emițător comun O caracteristică a dependenței de timp în acest caz, în comparație cu o dependență similară a curentului de colector într-un circuit cu o bază comună, este o creștere bruscă a curentului de colector atunci când direcția curentului de bază se schimbă de la /B la /B OLkms Curent de comutare de intrare /B co-tJ) o=: : ; , ; ; corespunde potențialului negativ al ieșirii de bază IB în raport cu Fig Dependența de timp față de ieșirea totală a emițătorului a curentului de bază (a) și a curentului de colector ( ) în timpul funcționării trans-ului (Fig) Prin urmare, neglijând testorul ca o cheie în ceea ce privește rezistența tranzistorului în circuitul de mod cu o saturație a emițătorului comun, fc;: : : ; ('Zke-Iy)/ Rh Curentul de comutare al bazei /B corespunde potențialului pozitiv al ieșirii de bază a IB , prin urmare, neglijând și rezistența tranzistorului, care este încă în modul saturație, obținem fk;Zke + IB)/Rh Modificarea curentului de colector în momentul comutării intrării unui tranzistor într-un circuit cu emițător comun este de obicei mică în comparație cu modificarea aceluiași curent într-un circuit de bază comună Calitatea tranzistorului din circuitul cheii electronice este evaluată nu numai de parametrii care caracterizează inerțialul raționalitatea proceselor din tranzistor re la comutare (timp pentru- întârziere, timp de creștere, timp de resorbție, timp de cădere), dar și în ceea ce privește parametrii care caracterizează rezistența de ieșire și de intrare a tranzistorului în modul de saturație Cea mai importantă

dintre ele este tensiunea de saturație colector-emițător Ikenas - tensiunea dintre bornele colectorului și emițătorului tranzistorului în modul de saturație la curenții de bază și de colector date § ZGOMOT ÎN TRANZISTOARE Tranzistorul, ca și alte dispozitive semiconductoare, are propriul zgomot, adică fluctuații aleatorii ale curentului și tensiune la ieșire în absența semnalelor la intrare Fenomenele fizice care provoacă apariția zgomotului într-un tranzistor sunt în esență aceleași ca și în alte dispozitive semiconductoare, adică zgomotul dintr-un tranzistor poate fi împărțit în termic, împușcat și în exces Zgomotul termic este cauzat de mișcarea aleatorie a sarcinilor într-un semiconductor datorită mișcării haotice termice a purtătorilor de sarcină, care este însoțită de fluctuații ale forței curente sau electromotoare, determinate de formula fizicianului american X Nyquist: i = kTRJlf, ( ) unde Jlf este banda de frecvență în care sunt măsurate fluctuațiile EMF Vitezele mișcării haotice termice ale purtătorilor de sarcină depășesc de obicei semnificativ vitezele de derivă ale acestor purtători într-un câmp electric Prin urmare, intensitatea zgomotului termic nu depinde de tensiunea aplicată, nici de curent, nici de frecvență (ci doar de banda de frecvență în care se măsoară zgomotul) Zgomotul de împușcare este asociat cu caracterul discret al sarcinii purtătorilor și cu natura aleatorie a injectării și extragerii acestor purtători prin tranziții electrice Valoarea RMS a zgomotului de împușcare ( ) Zgomotul excesiv este cauzat de procesele inegale de generare și recombinare a purtătorilor de sarcină, precum și procesele de captare și eliberare a purtătorilor de sarcină prin capcane de captare Toate aceste procese au loc cel mai intens pe suprafața semiconductoarelor Compoziția spectrală a acestor zgomote legate de durata de viață a purtătorilor de taxe Prin urmare, intensitatea zgomotului în exces scade odată cu creșterea frecvenței, aproximativ invers proporțional cu frecvența Principalul parametru care caracterizează zgomotul în tranzistori este cifra de zgomot ( ) unde Psign este puterea semnalului; Rsh - puterea zgomotului Figura de zgomot arată de câte ori se deteriorează raportul semnal-zgomot din cauza prezenței zgomotului intrinsec al amplificatorului (în acest caz, tranzistorul) Pentru un amplificator ideal, F = Uneori, cifra de zgomot este exprimată în decibeli Apoi ish bh ish byh non-noisy four-Când descriem proprietățile de zgomot ale lui o - se poate folosi tranzistorul iad circuitul său echivalent de zgomot, al cărui principiu de construcție este aproximativ același cu circuitele echivalente convenționale La construirea unui circuit echivalent formal, un tranzistor poate fi considerat ca un cvadripol ideal fără zgomot, în circuitele de intrare și de ieșire ale cărora sunt incluse generatoare de zgomot (Fig , a) Acest cvadripol poate fi înlocuit cu un circuit echivalent, cum ar fi în § Valorile EMF (sau curente) ale generatoarelor de zgomot pot fi determinate experimental Circuitele echivalente de zgomot fizic fac posibilă corelarea surselor de zgomot dintr-un tranzistor cu cifra de zgomot În același timp, generatoarele de zgomot incluse în circuitul echivalent sunt asociate cu anumite procese (Fig ,) Zgomotul joncțiunii emițătorului tranzistorului este împușcat și reflectat de generatorul corespunzător, zgomotul rezistenței active a bazei este termic Joncțiunea colectorului are atât zgomot de împușcare, cât și zgomot în exces Generatoarele de zgomot EMF pot fi determinate după cum urmează Curentul curge prin joncțiunea emițătorului; deci trebuie să fie zgomot de împuşcături În conformitate cu formula ( ), EMF din aceste zgomote, alocată rezistenței emițătorului (pentru o singură bandă de frecvență), de = y p er'§ ( )

În mod similar, EMF a zgomotului de împușcare în circuitul colectorului bdk \u d y r kg; ( ) Baza este rezistența activă; prin urmare, zgomot termic cu EMF btb = y kTr[; ( ) EMF de zgomot în exces legat complet de circuitul colector poate fi determinat prin formula empirică izbk \u d KIkB (~ sq) -f, (,) La · unde K este un coeficient care depinde de materialul și tratamentul de suprafață al semiconductorului; a și b sunt exponenți având valori în în intervalul , - , Folosind circuitul echivalent (Figura ,), puteți determina zgomotul generat de tranzistor sistem Cifra de zgomot a unui tranzistor depinde de modul de funcționare și de frecvența acestuia Dependenta de coeficient zgomot de la curentul tranzistorului lena in fig , a, din care se poate observa că cifra de zgomot la Te mic, când predomină zgomotul termic și în exces, la început depinde relativ slab de curent, iar cu o creștere suplimentară a curentului, datorită creșterii rolului zgomotul de împușcare Igf) crește aproximativ în proporție raţional ~-· Fig , Dependențe ale coeficientului-C cu o modificare a tensiunii factorului de zgomot al tranzistorului: factorul de zgomot al lectorului este, de asemenea, a - de curentul emițătorului; b - de la prima se schimbă puțin (Fig tensiunea colectorului; c - din frecvență (/ - suprafață poluată - , ,), iar apoi frumusețea cristalului crește; este în mod normal rapid Acest lucru se datorează faptului că suprafața tratată; - la tensiuni joase, coeficientul de zgomot cu procesare îmbunătățită) este determinat de zgomotul termic și de împușcare, iar la tensiuni înalte începe să predomine zgomotul în exces Cu o creștere a frecvenței (Fig , c), cifra de zgomot scade mai întâi datorită scăderii rolului zgomotului în exces, apoi rămâne constantă într-un anumit interval de frecvență Aici este determinată de zgomotul termic și de împușcare La frecvențele în care câștigul tranzistorului scade, cifra zgomotului crește din nou Aceasta rezultă din definiția cifrei de zgomot ( ) - la frecvențe foarte înalte, puterea semnalului de ieșire scade, în timp ce puterea de zgomot generată în tranzistor nu se modifică Starea suprafeței semiconductoarelor afectează semnificativ zgomotul în exces (Fig , c) Prin urmare, crearea tranzistoarelor cu zgomot redus se bazează pe îmbunătățirea tratamentului suprafeței § D TEHNOLOGIE PRODUCEREA SI PROIECTAREA &TRANZISTOARELOR IPOLARE Clasificare dupa putere si frecventa În funcție de puterea de disipare maximă admisă, tranzistoarele bipolare pot fi împărțite în tranzistoare de putere mică (Pmax :::;; , W), putere medie (, , W); în funcție de valoarea frecvenței de tăiere a coeficientului de transfer de curent - la tranzistoare de frecvență joasă MHz) Metode de formare structuri de tranzistori În perioada inițială a dezvoltării tehnologiei tranzistoarelor, tranzistoarele bipolare erau fabricate numai din germaniu prin metoda fuzionarii impurităților - tranzistoare din aliaj În anii următori, după ce au depășit o serie de dificultăți în purificarea siliciului monocristal, au fost create tranzistoare de siliciu Siliciul are un interval de bandă mai mare Prin urmare, tranzistoarele de siliciu pot funcționa la temperaturi mai ridicate (până la ° C), au curenți inversi mai mici de colector și emițător și tensiuni de defalcare mai mari Pe monocristalele de siliciu, este relativ ușor să se creeze un strat de dioxid de siliciu, care are proprietăți de mascare, prin difuzia dopanților în siliciu Acest a condus în producția de tranzistori de siliciu și alte dispozitive de siliciu la utilizarea pe scară largă a metodelor de înaltă performanță și precise ale tehnologiei plane În legătură cu avantajele enumerate, trans- termistorii au înlocuit aproape complet dispozitivele similare cu germaniu Principala metodă de formare a structurilor de tranzistoare

ale tranzistoarelor moderne este tehnologia plană (vezi §) Tranzistoarele realizate folosind această tehnologie se numesc planare Unul dintre avantajele tehnologiei planare Logica constă în versatilitatea sa, care permite unuia și aceluiași echipament să organizeze producția de tranzistori cu parametri diferiți prin schimbarea setului de măști foto și a modurilor de difuzie a impurităților Cu tehnologia plană, este posibil să se creeze tranzistori cu proprietăți bune de frecvență Acest lucru se datorează faptului că în acest caz este posibil să se efectueze difuzie selectivă, adică să se introducă impurități numai în cer II zone limitate, controlând strict adâncimea difuziei În același timp, metodele optice utilizate în fotolitografie fac posibilă combinarea acestor zone cu o mai mare acuratețe Ca rezultat, este posibil să se producă tranzistori cu o grosime de bază de fracțiuni de micrometru și dimensiuni ale joncțiunilor redresor-electrice de câțiva micrometri Frecvența de tăiere a coeficientului de transfer de curent al tranzistoarelor bipolare ajunge la GHz Punctele de ieșire ale joncțiunilor pn ale unui tranzistor plan de pe suprafața unui cristal semiconductor sunt sub un strat de dioxid de siliciu, care este un bun dielectric Acesta servește la protejarea suprafeței de siliciu de influențele externe, crescând stabilitatea parametrilor și fiabilitatea tranzistoarelor Pentru a spori proprietățile de protecție ale stratului de dioxid de siliciu, deasupra se aplică un strat subțire de sticlă fuzibilă Pentru a reduce rezistența de volum a regiunii colectoare a tranzistorului, formarea structurii tranzistorului se realizează într-un strat epitaxial subțire cu o concentrație relativ scăzută de impurități depuse pe substrat cu rezistență scăzută cu conductivitate electrică de același tip De exemplu, cu un substrat și un strat epitaxial cu conductivitate electrică de tip n, structura rezultată a unui tranzistor de tip n+-p-n-p+ are o regiune colectoare cu două straturi, constând dintr-o parte subțire de înaltă rezistență a stratului epitaxial și un substrat cu rezistență scăzută Joncțiunea colectorului, situată într-un strat epitaxial de înaltă rezistență, are o capacitate de barieră mică și o tensiune mare de defalcare Tranzistorii cu o astfel de structură se numesc epitaxiale-dar-hilanare Ele alcătuiesc cea mai mare parte a tranzistoarelor produse în masă Metode de îmbunătățire a penetrației tensiunea joncțiunii colectorului Tensiunea de defalcare a joncțiunii colectorului (și emițătorului) a unui tranzistor plan sau epitaxial-planar se poate dovedi a fi scăzută, în primul rând, din cauza incluziunilor străine și a defectelor care pot fi în cristalul semiconductor original sau pot apărea în spațiu regiune de sarcină a joncțiunilor în procesul de formare a acestora Probabilitatea de incluziuni străine, fisuri și alte defecte în apropierea suprafeței cristalului este deosebit de mare Ele rămân acolo după diferite tratamente de suprafață Incluziunile străine, desigur, diferă de valorile semiconductoarelor permisivității și rezistivității relative De aceea, incluziunile străine conduc la o distorsiune a modelului câmpului electric și la o scădere a tensiunii de defalcare Este posibilă reducerea probabilității de incluziuni și defecte străine numai prin îmbunătățirea calității materiilor prime și îndeplinirea tuturor cerințelor procesului tehnologic z a) rJ) Fig Structuri ale tranzistoarelor epitaxial-planare (a) și mesaplanare ( ): strat epitaxial de siliciu cu o grosime de aproximativ microni; - substrat de siliciu puternic dopat cu o grosime de aproximativ µm În al doilea rând, tensiunea de rupere a joncțiunii colectorului se poate dovedi a fi scăzută din cauza defectării suprafeței din cauza densității mari a

stărilor de suprafață de un anumit tip și a prezenței unui strat îmbogățit pe suprafața unei regiuni de înaltă rezistență adiacentă joncţiune (vezi §) Acest tip de defalcare a tranziției poate exista chiar și în cristale, a căror suprafață nu are perturbări mecanice Pentru a reduce probabilitatea unei astfel de defecțiuni, este necesar să se utilizeze metode care să asigure cea mai scăzută densitate a stărilor de suprafață la prelucrarea suprafeței cristalului și la creșterea unui strat de dioxid de siliciu În al treilea rând, tensiunea de rupere a joncțiunii poate fi scăzută datorită curburii joncțiunii pn la marginile acesteia (Fig , a) Intensitatea câmpului electric este întotdeauna mai mare în apropierea proeminențelor ascuțite, unde liniile de forță curente se îngroașă Adâncimea joncțiunilor pn în tranzistoarele fabricate folosind tehnologia plană este de obicei de la zecimi la unități de micrometri Aceasta înseamnă că raza de curbură a joncțiunilor p-n în punctele de ieșire pe suprafața cristalului este în cel mai bun caz de câțiva micrometri Reducerea razei de curbură a marginilor joncțiunii pn cu un ordin de mărime duce la o scădere a tensiunii de rupere și cu aproximativ un ordin de mărime Una dintre metodele de eliminare a defalcării asociate cu curbura joncțiunii pn este gravarea selectivă a părții cristalului în care se află marginile rotunjite ale joncțiunii (Fig ,) Structura unui tranzistor obținut prin gravare selectivă se numește mesastructură, iar tranzistoarele cu mesastructură, în care joncțiunile pn sunt formate prin tehnologie plană, se numesc mesaplanare În structura tranzistorului mesaplanar rămâne doar partea plată a joncțiunii colectorului, care are o tensiune de rupere mult mai mare La gravarea părților rotunjite ale joncțiunii colectorului, se îndepărtează secțiunile apropiate de suprafață ale bazei și ale colectorului, care au cel mai mare număr de încălcări ale rețelei cristaline și / (+ Orez , Parte a joncțiunii colectorului care se confruntă cu suprafața cristalului de siliciu într-un tranzistor cu un electrod de bază expandat (cu metalizare cu oxid): limitele joncțiunii fără tensiune externă; -granițe de tranziție cu tensiune inversă; - - - limita de tranziție metalurgică DCHRRILCHZIYA acceptori -LH~m~siO i- / -"-P p π p+ Orez , Partea periferică a structurii unui tranzistor plan epitaxial cu un inel de protecție de difuzie format prin difuzie suplimentară a acceptoarelor altor defecte, care contribuie, de asemenea, la creșterea tensiunii de defalcare O altă metodă de creștere a tensiunii de rupere este crearea unui electrod metalic expandat către regiunea de bază, extinzându-se peste stratul de dioxid de siliciu deasupra joncțiunii colectorului și parțial deasupra regiunii colectorului (Figura) Când o tensiune este aplicată joncțiunii colectorului în direcția opusă sub partea extinsă a electrodului de bază în regiunea colectorului de lângă suprafață, apare un strat epuizat din purtătorii principali (în acest caz, electroni) Acest lucru duce la o grosime mai mare a joncțiunii colectoare în apropierea suprafeței cristalului în comparație cu grosimea părții sale plate, precum și la o scădere a curburii joncțiunii Toate acestea contribuie la creșterea tensiunii de defalcare a joncțiunii colectorului de lângă suprafața cristalului O altă metodă de creștere a tensiunii de rupere a tranziției colectorului este formarea unui inel de protecție în punctul în care tranziția iese pe suprafața cristalului (Fig) Pentru a face acest lucru, este necesar să se efectueze difuzie suplimentară a acceptoarelor (pentru un tranzistor de tip n-p-n) de-a lungul periferiei colectorului tor tranziție cu toate operațiile auxiliare ale oxidului ion, fotolitografie etc , efectuând această difuzie la o adâncime mai mare în comparație cu difuzia în timpul

formării regiunii de bază Ca urmare, curbura joncțiunii colectoare scade în punctele în care ajunge la suprafața cristalului sau, cu alte cuvinte, crește raza de curbură în partea periferică a joncțiunii În cele din urmă, tensiunea de defalcare a joncțiunii colectorului poate fi crescută prin metoda formării inelelor de divizare a difuziei (Fig) Inelele divizoare de difuzie se formează simultan cu crearea regiunii de bază a tranzistorului la o anumită distanță de acesta Cu o tensiune inversă la joncțiunea colectorului, această joncțiune se extinde și se închide cu joncțiunea celui mai apropiat inel de difuzie Un potențial plutitor este stabilit pe acest prim inel de difuzie și o tensiune inversă este stabilită pe joncțiunea pn a primului inel de difuzie, care în termeni absoluti + valoare mai mică decât colectivul tranziție spinoasă Orez , Periferic În prezența unei a doua părți de difuzie a inelului de tranziție al colectorului, joncțiunea sa p-n se îmbină cu două inele de divizare a difuziei cu tranziția primului inel de difuzie, creat simultan din inel Un electrod poate fi depus pe primul inel de difuzie prin formarea probei de bază, extinsă cu conductivitate electrică peste un strat de dioxid de siliciu de tip p până la al doilea inel de difuzie Acest electrod, care nu este conectat nicăieri și are un potențial negativ plutitor în raport cu colectorul, va ajuta la închiderea tranzițiilor primului și celui de-al doilea inel divizor de difuzie Particularități proiecte și structuri tranzistoare puternice La dezvoltarea tranzistoarelor de mare putere, pe lângă acele sarcini care secara sunt rezolvate la crearea tranzistoarelor de putere redusă, trebuie rezolvate următoarele probleme specifice:) tranzistoarele puternice funcționează la curenți destul de mari, deci efectele asociate cu aceasta sunt deosebit de pronunțate la ei și acest lucru trebuie prevăzut (vezi §);) pentru a asigura o putere suficientă în sarcină, se folosesc de obicei surse de alimentare cu o tensiune înaltă, prin urmare, cel mai adesea, tranzistoarele puternice trebuie proiectate pentru tensiuni de avarie mai mari decât cele de putere redusă;) tranzistoarele puternice trebuie să aibă o eficiență ridicată și, în special, o mică cădere de tensiune pe tranzistor în modul de saturație, adică, rezistență scăzută la saturație;) proiectarea unui tranzistor puternic trebuie să asigure îndepărtarea eficientă a căldurii disipate în acesta;) o supraîncălzire semnificativă a părților active ale unui tranzistor puternic cu dimensiuni mari de cristale semiconductoare utilizate în acesta face necesară luarea în considerare a tensiunilor mecanice care pot apărea din cauza diferențelor de temperatură z ! z c= aJ JO) Orez , Geometria electrozilor unui tranzistor puternic cu microunde: a - proiectare cu un emițător pieptene; b - design multi-emițător cu emițători de dungi; c - design multi-emițător cu emițători rotunzi; - electrod de bază; - emițător; - electrodul emițătorului coeficienții de dilatare liniară a semiconductorului și a altor elemente structurale În plus, tranzistoarele puternice trebuie să fie suficient de rapide Pentru a furniza curenți mari în tranzistoare, sunt necesare suprafețe mari de emițător Cu toate acestea, o simplă creștere a dimensiunii emițătorului ar duce la o deplasare semnificativă a curentului către marginile joncțiunii emițătorului din cauza căderii de tensiune pe rezistența de bază în vrac Tehnologia plană pentru formarea structurilor de tranzistori face posibilă fabricarea emițătorilor de formă complexă Una dintre opțiunile pentru structura tranzistoarelor planare puternice este un emițător pieptene (Fig , a) Numărul de dinți ai "pieptenului" poate fi de până la câteva zeci Deoarece lățimea fiecărui dinte este mică, efectul deplasării curentului la marginea emițătorului este

neglijabil În același timp, rezistența de bază este redusă, ceea ce crește câștigul de putere la frecvență înaltă și reduce rezistența la saturație Cu toate acestea, dacă benzile emițătoare sunt prea înguste și lungi, scăderea de tensiune de-a lungul lor la curenți mari poate afecta Alte opțiuni pentru structurile tranzistoarelor puternice sunt structurile cu un număr mare de emițători neînrudiți sub formă de benzi (Fig ,) sau discuri (Fig , c) Acești emițători sunt conectați unul la altul prin placare peste un strat de dioxid de siliciu Pentru a asigura o mai bună disipare a căldurii, un cristal semiconductor cu structura unui tranzistor puternic este lipit pe suportul de cristal cu partea colectorului Dacă este necesar să Dacă colectorul este scos din carcasa tranzistorului, atunci între cristalul semiconductor și suportul de cristal este plasată o garnitură izolatoare din ceramică de beriliu, care are o conductivitate termică bună (Fig) Baza carcasa -suport- cristal- b corp - din cupru Deoarece îndepărtarea căldurii din carcasă ar trebui de obicei efectuată pe șasiul întregului dispozitiv sau pe radiator, pentru a reduce rezistența termică, suprafața inferioară a bazei carcasei nu este vopsită Caracteristici ale designului și structurii tranzistoarelor cu microunde Aproape toate tranzistoarele cu microunde, ca și alte tranzistoare bipolare, sunt tranzistoare plane epitaxiale de siliciu Substratul cu rezistență scăzută al structurii epitaxiale originale oferă o rezistență scăzută a regiunii colectoare și limitează acumularea de purtători în această regiune Pentru a obține proprietăți bune de frecvență, parametrii paraziți trebuie minimizați și Orez , Proiectarea părților active ale structurii unui tranzistor cu microunde puternic Prin urmare, grosimea bazei tranzistorului cu microunde: - o placă de beril-stori are uneori mai mică de , microni, din ceramică cu litiu; - lățimea pavilionului benzilor emițătoare - mai mică de; - inel; - bila- µm Pentru a reduce sopro-lonul volumetric; izolator ceramic; - este necesară rezistența internă a bazei cu grosimea sa mică concluzie; - tub; In - gasim o concentratie mare de impuritati in orificiul de evacuare exterior; -baza semiconductoare de cristal O metodă promițătoare pentru formarea regiunilor de bază și emițătoare de dimensiuni mici și cu concentrația necesară de impurități este metoda implantării ionice Formarea regiunilor de bază subțiri face necesară existența unor straturi de siliciu epitaxiale cu o rețea cristalină aproape perfectă, fără dislocații și alte defecte de stivuire Operațiile tehnologice utilizate la crearea structurilor tranzistoarelor nu ar trebui să conducă la formarea unor astfel de defecte În caz contrar, va exista o probabilitate mare de scurtcircuitare a regiunilor emițătorului și colectorului Funcționarea unui tranzistor în regiunea de microunde poate fi afectată de capacitățile dintre terminale și de inductanța terminalelor Prin urmare, sunt utilizate ieșiri de bandă cu inductanță redusă ness Pentru a reduce capacitățile parazitare, este de dorit să se izoleze carcasa tranzistorului cu microunde împreună cu radiatorul, dacă există, de regiunea colectorului, menținând în același timp o bună îndepărtare a căldurii din joncțiunea colectorului Acest lucru se realizează prin fixarea cristalului siliciu cu structură de tranzistor pe o placă ceramică de beriliu (Fig) Principalele dificultăți apar la crearea tranzistoarelor cu microunde de mare putere, deoarece cerințele pentru structura unui tranzistor de înaltă frecvență contrazic practic cerințele pentru structura unui tranzistor de mare putere Deci, unul dintre principalii factori care limitează intervalul de frecvență de funcționare a unui tranzistor cu microunde este timpul de zbor al purtătorilor de sarcină prin joncțiunea colectorului (vezi §) Pentru a

crește frecvența de funcționare, este de dorit să se reducă grosimea joncțiunii colectorului Cu toate acestea, în acest caz, tensiunea de avarie se dovedește a fi mică Ca rezultat, tranzistoarele cu microunde cu frecvențe de tăiere înalte au o putere de disipare maximă admisă mai mică Cele mai bune dintre tranzistoarele cu microunde de astăzi cu frecvențe de tăiere de câțiva gigaherți sunt proiectate pentru o disipare maximă admisă a puterii în timpul funcționării continue de câțiva wați § H TRANZISTORI SINGURI Un tranzistor unijoncție este un dispozitiv semiconductor cu o joncțiune electrică de redresare și trei terminale, ale căror proprietăți de amplificare a comutației se datorează modulării rezistenței de bază ca urmare a injectării în acesta a purtătorilor de sarcină minori Structura unui tranzistor unijunction și circuitul său echivalent sunt prezentate în fig , Regiunea emițătorului (regiunea cu conductivitate electrică de tip p) trebuie să fie mai puternic dopată decât regiunea de bază (regiunea cu conductivitate electrică de tip n), astfel încât atunci când joncțiunea emițătorului este pornită direct, curentul continuu prin ea are practic doar o componentă de gaură În acest caz, din cauza injectării purtătorilor minoritari în baza tranzistorului și datorită acumulării de purtători majori care intră în bază printr-unul dintre contactele neredresoare la bază pentru a compensa încărcătura injectată a purtătorilor minoritari, rezistența de bază va scădea (modulația) și va crește curentul între contactele neredresoare la bază sau curentul din circuitul de sarcină Dacă la bornele de bază ale dispozitivului se aplică o tensiune interbază IB B , atunci din cauza trecerii curentului /B de-a lungul bazei, va exista o cădere de tensiune longitudinală Să notăm căderea de tensiune pe partea bazei cu lungimea de (Fig , a) ca I · Această cădere de tensiune deplasează joncțiunea pn în sens opus Prin urmare, când tensiunea la emițătorul IeBo I; >Iy) prin electrodul de control (c) una dintre zonele de bază cu tranziție ohmică între electrodul de control și bază (Fig , a), nivelul de injecție prin joncțiunea emițătorului adiacent acestei baze poate fi crescut prin aplicarea o tensiune pozitivă în raport cu catodul către electrodul de control Prin urmare, tiristorul triodă poate fi comutat de la starea închisă la starea deschisă la momentul necesar chiar și cu o tensiune anodică mică (Fig , c) Comutarea unui tiristor triodă prin aplicarea unei tensiuni continue la electrodul de control sau curent prin acest electrod poate fi reprezentată dintr-un punct de vedere diferit ca transferarea unei structuri p-p-p a tranzistorului în modul de saturație la un curent de bază mare În acest caz, joncțiunea colector a structurii tranzistorului (este și joncțiunea colector a tiristorului) este deplasată în direcția înainte Echilibrul curenților într-un tiristor triodă poate fi scris conform analogie cu ( ), dar ținând cont de faptul că suma curenților principalului și ( ) sau ( ) trece prin joncțiunea emițătorului din stânga (figura de control: , a) Astfel, ecuația CVC a unui tiristor triodă într-un mod închis acea stare: I ( ) unde al + a Deschid , deschis t curentul electrodului de control (a), tensiunea principală pe tiristor ( ) și curentul principal prin tiristor (c) caracterizarea procesului de includere a acestuia Timpul de întârziere pe electrodul de control al tiristorului u zd este intervalul de timp dintre momentul de la începutul impulsului de deblocare a circuitului electric de control da, corespunzând la , din amplitudinea sa și momentul în care tensiunea principală scade la , din valoarea diferenței de tensiune în stările închis și deschis ale tiristorului sau când curentul principal crește la , din valoarea sa în stare deschis Timpul de creștere pentru tiristorul Iнр este intervalul

de timp în care curentul principal crește de la , la , din valoarea curentului în starea deschisă sau tensiunea principală scade de la , la , din diferența de tensiune în stările Ideschis și deschis, -iristor (Fig) În ciuda condiționalității determinării tuturor parametrilor enumerați ai procesului tranzitoriu de pornire a tiristorului, se poate citi că timpul de întârziere pentru electrodul de control al tiristorului este determinat de timpul de reîncărcare a capacității de barieră a joncțiunii emitătorului, după cum precum și timpul necesar purtătorilor de sarcină injectați să treacă prin regiunea de bază și tranziția colectorului Timpul de creștere pentru un tiristor este determinat de inerția procesului de acumulare a purtătorilor de sarcină neechilibrați în regiunile de bază și de inerția de reîncărcare a capacității de barieră a joncțiunii colectorului Intervalul de timp determinat de timpul de creștere pentru tiristor, modificarea curentului principal care trece prin tiristor și tensiunea dintre electrozii principali corespunde secțiunii de tranziție BAC Pentru aceasta, suma coeficienților de transfer de curent diferențial ai emitătorului structurilor tranzistoarelor care alcătuiesc tiristorul trebuie să fie egală cu unu De obicei, tiristorul este conectat la un circuit care are o rezistență mai mică decât valoarea absolută a rezistenței diferențiale negative a tiristorului în secțiunea de tranziție a BAC-ului său Prin urmare, în timpul de creștere la aceleași tensiuni, curenții care trec prin tiristor în circuitul real depășesc valorile curenților din secțiunea tranzitorie a BAC a tiristorului În acest caz, coeficientul diferenţial total de transfer de curent al structurii tiristorului depăşeşte unitatea, care corespunde etapei active de pornire a tiristorului Dacă în acest moment opriți electrodul de control, apoi tiristorul va intra "independent" în starea deschisă Aceasta înseamnă că durata impulsului de curent al electrodului de control necesară pentru a porni tiristorul trebuie să fie mai mare decât timpul de întârziere Finalizarea procesului tiristoarele iau în considerare momentul schimbării polarității tensiunii activate joncțiune de colector Trebuie remarcat faptul că în în timpul proceselor tranzitorii, curenți mari trec prin tiristor la tensiuni înalte pe acesta, ceea ce duce la valori mari ale du / dt eliberate în tiristor, ca în Fig Dependența puterii de comutare a tensiunii a pornirii tiristorului de pierderile de viteză Puterea medie a creșterii com-creșterii creșterii pierderilor mutaționale furnizate poate duce la o tensiune pe aceasta, ținând cont de supraîncălzirea inacceptabilă a capacității de barieră numai tiristo a joncțiunii colectorului (curba pa la o frecvență mare de supraîncălzire) /) și numai capacități comutatoare de barieră joncțiuni emitătoare (cree-comutarea tiristorului prin intermediul) crescând strict tensiunea dintre electrozii principali Cu o creștere rapidă a tensiunii principale pe tiristor, un curent capacitiv va trece prin acesta, datorită prezenței capacităților de barieră ale joncțiunilor colectorului și emitătorului Să luăm în considerare mai întâi influența capacității de barieră a joncțiunii colectorului Curentul capacitiv prin joncțiunea colectorului IC= = Sk(du/dt) Cu cât este mai mare rata de modificare a tensiunii principale pe tiristor, cu atât este mai mare valoarea curentului capacitiv prin joncțiunea colectorului Acest curent, care trece prin joncțiunile emitătorului, determină o creștere a coeficienților de transfer ai curenților emitătorului structurilor tranzistoarelor, ceea ce duce la pornirea tiristorului la tensiunea principală, care este mai mică decât tensiunea de pornire la curent continuu Ivklo (Fig O) Capacitatele de barieră ale joncțiunilor emitătorului sunt cauza

apariției de curenți capacitivi prin aceste joncțiuni cu o schimbare rapidă a tensiunii principale pe tiristor Curenții capacitivi nu sunt asociați cu injectarea purtătorilor de sarcină, prin urmare, cu o creștere a ratei de schimbare a tensiunii principale, tiristorul ar trebui să pornească la tensiuni mai mari decât Ivklo (Fig O), dacă sunt luate în considerare numai capacitățile de barieră ale joncțiunilor emițătorului În practică, capacitatea de barieră a joncțiunii colectorului are un efect mai puternic, deoarece oprește rezistența activă mare a joncțiunii colectorului, care este polarizată în direcția opusă atunci când tiristorul este închis Capacitatele de barieră ale joncțiunilor emițătorului în sine se dovedesc a fi manevrate de mici rezistențe active ale joncțiunilor emițătorului, care sunt polarizate în direcția înainte când tiristorul este închis Prin urmare, tensiunea de pornire a tiristorului scade odată cu creșterea ratei de creștere a tensiunii principale Cu toate acestea, efectul pornirii tiristoarelor la o rată mare de creștere a tensiunii principale se dovedește adesea a nu fi o proprietate pozitivă, ci negativă, deoarece poate duce la pornirea spontană a tiristorului, de exemplu, atunci când conectarea unei surse de alimentare O modalitate eficientă de a reduce acest efect este ocolirea joncțiunii emițătorului (vezi §) Pe lângă cele trei metode principale luate în considerare pentru pornirea tiristoarelor, se poate observa și posibilitatea pornirii unui tiristor prin iluminarea unui cristal cu o structură tiristor Dar un astfel de tiristor aparține dispozitivelor semiconductoare optoelectronice și, prin urmare, va fi luat în considerare în Cap Oprirea tiristoarelor Oprirea tiristorului prin reducerea curentului din circuitul electrozilor principali la o valoare mai mică decât curentul de menținere sau prin întreruperea circuitului electrozilor principali Tiristorul va fi oprit, adică transferat din starea deschisă în cea închisă, numai după disiparea purtătorilor de sarcină neechilibrați în regiunile de bază Dacă, înainte de sfârșitul procesului de oprire, tensiunea este aplicată din nou între electrozii principali ai tiristorului, atunci acesta va fi în starea de pornire Astfel, este nevoie de ceva timp pentru a opri tiristorul Când tiristorul este oprit prin întreruperea circuitului electrozilor principali, resorbția purtătorilor de sarcină neechilibrați are loc numai ca urmare a recombinării Această metodă de oprire este utilizată atunci când timpul de oprire al tiristorului nu afectează funcționarea unui anumit circuit Oprirea tiristorului prin schimbarea polarității tensiunii anodului Pentru a accelera procesul de disipare a purtătorilor de sarcină neechilibrați acumulați în regiunile de bază în timpul trecerii curentului continuu printr-un tiristor deschis, este necesară scăderea barierei de potențial a joncțiunii colectorului Cu toate acestea, joncțiunea colectorului în starea deschisă a tiristorului era deja polarizat în direcția înainte din cauza purtătorilor de sarcină neechilibrați acumulați în regiunile de bază și, prin urmare, avea o rezistență scăzută Prin urmare, ponderea joncțiunii colectorului la comutarea tiristorului la tensiune inversă reprezintă o parte foarte mică din tensiunea externă totală Datorită rezistenței scăzute a tiristorului, care este încă în aer liber , IlJt} a)) Orez Curent de dependenţă Isinas: -Ii: >Ii:i niyah pe scurgere, depășind tensiunea de saturație Cu toate acestea, lungimea părții blocate a canalului crește datorită creșterii grosimii joncțiunii pn cu creșterea tensiunii de drenaj (Fig b), iar grosimea joncțiunii pn este proporțională fie cu rădăcina pătrată, fie cu rădăcina cubă a tensiunii (vezi § și) Prin urmare, în partea plată a caracteristicii, există o oarecare creștere

scăderea curentului de scurgere cu creșterea tensiunii de drenaj Acum luați în considerare decalajul și modificarea caracteristicilor statice cu o schimbare a tensiunii de poartă Când o tensiune de o astfel de polaritate în raport cu sursa este aplicată porții , ceea ce corespunde polarării inverse a joncțiunii pn a porții și cu o creștere a acestei tensiuni, secțiunea transversală inițială a canalului scade în valoare absolută Prin urmare, secțiunile inițiale ale caracteristicilor statice de ieșire la tensiuni de poartă altele decât zero au o pantă diferită, corespunzătoare rezistențelor inițiale mari ale canalului static Cu secțiuni transversale inițiale mai mici, suprapunerea canal datorită creșterii tensiunii de dren are loc la tensiuni de saturație mai mici (vezi Fig , a) La tensiuni mari de scurgere, poate apărea defectarea joncțiunii p-n a porții Tensiunea inversă la joncțiunea pn a porții variază pe lungimea canalului, atingând un maxim valoarea la capătul de scurgere al canalului Tensiunea aplicată joncțiunii p-n porții în această locație este suma tensiunilor de dren și de poartă Astfel, defectarea FET-ului poate apărea la tensiuni de drenaj diferite, în funcție de tensiunea de poartă Cu cât tensiunea la poartă este mai mare, cu atât este mai mică tensiunea la dren, la care se va produce o defalcare a joncțiunii pn a porții (vezi Fig , a) Tranzistoarele cu efect de câmp sunt de obicei fabricate pe bază de siliciu Prin urmare, defalcarea unor astfel de tranzistori are un caracter de avalanșă Caracteristicile de transmisie statică ale FET-ului conform ( ) sunt dependențele curentului drenaj pe tensiunea de poartă la diferite tensiuni de drenaj constante Deoarece principalul mod de funcționare al tranzistoarelor cu efect de câmp este modul de saturație a curentului de scurgere, care corespunde părților plate ale caracteristicilor statice de ieșire atunci de cel mai mare interes este dependența curentului de saturație de tensiunea de la poartă la o tensiune constantă la dren Natura acestei dependențe este clară din principiul funcționării unui tranzistor cu efect de câmp cu o joncțiune pn de control Când tensiunea de scurgere se modifică, schimbarea caracteristicilor de transmisie poate fi practic neglijată din cauza modificării mici a curentului în partea plată a caracteristicilor statice de ieșire (vezi Fig ,) Tensiunea dintre poarta și sursa FET-ului cu o joncțiune de control la care curentul de scurgere atinge o valoare scăzută predeterminată se numește tensiune de tăiere a FET-ului /zioți Când s-au luat în considerare caracteristicile statice ale unui tranzistor cu efect de câmp, s-au remarcat principalii săi parametri statici Conform caracteristicii de transmisie statică, se poate determina încă un parametru principal al tranzistorului cu efect de câmp, care îi caracterizează proprietățile de amplificare, panta caracteristicii tranzistorului cu efect de câmp S, care este raportul modificării drenului curent la modificarea tensiunii de poartă în timpul unui scurtcircuit de curent alternativ la ieșirea tranzistorului într-un circuit cu o sursă comună: s- !! !s: I -siiZi Isi = const Panta tranzistorului cu efect de câmp este de obicei de câtiva miliamperi pe volt § CALCULUL CARACTERISTICILOR STATICE DE IEȘIRE ALE UNUI TRANZISTOR DE CÂMP CU O TRANZIȚIE DE CONTROL Neglijând rezistența de volum a cristalului semiconductor în zonele dintre capetele canalului și contactele sursă și dren, partea de lucru a tranzistorului cu efect de câmp poate fi reprezentată într-o formă simplificată (Fig) Densitatea curentului în canalul de :p E =y=-y-, (,) dx și unde y este conductivitatea specifică a ka- nala În prima aproximare, vom calcula faceți conductivitatea specifică a materialului canalului independentă de intensitatea câmpului electric, adică nu luați în considerare

modificarea mobilității, cu tranziții p-p de control Se modifică densitatea de curent în canal de-a lungul lungimii sale datorită modificării secțiunea canalului și modificarea corespunzătoare a tensiunii Curentul în canalul tranzistorului, neschimbat pe tot canalul, fc \u d -ybw, ( ) unde b este lățimea canalului Grosimea canalului w depinde de grosimea joncțiunilor pn: w=a- (,) Grosimea joncțiunii pn depinde de tensiunea pe ea (vezi §) În expresia ( ), pentru grosimea unei joncțiuni pn ascuțite, se poate neglija diferența de potențial de contact la joncțiunea pn în comparație cu tensiunea inversă relativ mare aplicată la poarta tranzistorului cu efect de câmp Cu toate acestea, este necesar să se țină cont de neechipotențialitatea canalului, care apare din cauza trecerii curentului prin canal de la sursă la scurgere Apoi ~ / np (Și) U = V qN Isi us § PARAMETRI SI PROPRIETATI ALE TRANZISTOARELOR DE CAMP CU PORTA IZOLATA Parametrul principal al tranzistorului cu efect de câmp cu o poartă izolată, care reflectă proprietățile sale de amplificare, este panta caracteristicii (vezi §) Abruptul caracteristicii de transmisie la frecvență joasă, corespunzătoare părții abrupte a caracteristicilor statice de ieșire, poate fi determinată prin diferențierea ( ) în funcție de tensiune și tensiune de scurgere modificabilă: S = dfc (,) bIzi UcH=const / SÎ Pentru partea plată a caracteristicilor statice de ieșire, panta caracteristicii de transmisie poate fi obținută prin diferențierea ( ) față de tensiunea de poartă: • tse,S kV (II) = / ZI -ZI atunci ( ) După cum se poate observa, pentru a crește abruptul caracteristicii, semiconductorul original trebuie să aibă o mobilitate mai mare a purtătorilor de sarcină Un tranzistor cu canal n are o pantă mai mare decât un tranzistor cu canal p, deoarece mobilitatea electronilor depășește de obicei mobilitatea găurilor Abruptul caracteristicii va fi mai mare la tranzistoarele cu efect de câmp cu o lungime de canal mai scurtă Limita inferioară a lungimii canalului este limitată de tehnologia de fabricație De obicei, pentru fabricarea tranzistoarelor cu efect de câmp cu o poartă izolată, tehnologia plană și metoda fotolitografiei, a cărei rezoluție nu permite obținerea unei lungimi de canal mai mică de - microni Panta caracteristicii poate fi mărită prin creșterea capacității specifice dintre poartă și canal Această capacitate este determinată de permisivitatea relativă și de grosimea stratului dielectric de sub poartă Utilizarea unui dielectric cu o permitivitate relativă mai mare Acest lucru va duce la o creștere a abruptului caracteristicii, dar în același timp vor crește și capacități parazitare între poartă și scurgere, între poartă și sursă, ceea ce va afecta negativ - asupra proprietăților de frecvență ale tranzistorului cu efect de câmp Reducerea grosimii stratului dielectric de sub poartă poate duce, de asemenea, la o scădere inacceptabilă a tensiunii de rupere a acestui strat între poartă și scurgere O creștere a lățimii canalului duce la o creștere a abruptului caracteristicii, dar în același timp la o deteriorare a proprietăților de frecvență ale tranzistorului cu efect de câmp datorită creșterii capacităților parazite Circuitul fizic echivalent al FET-ului cu o poartă izolată este similar cu circuitul fizic echivalent al unui FET cu o tranziție de control (vezi Fig) Totuși, datorită faptului că poarta este izolată de semiconductor printr-un strat dielectric, rezistențele active dintre poartă și sursă, dintre poartă și dren, se dovedesc a fi foarte mari Prin urmare, ele pot fi neglijate chiar și la frecvențe relativ scăzute în comparație cu capacitățile conectate în paralel De asemenea, puteți neglija rezistențele foarte mici ale hyi Gs, care sunt rezistențele diferențiale ale regiunilor puternic dopate ale semiconductorului de

sub sursă și dren Viteza tranzistoarelor cu efect de câmp cu o poartă izolată este determinată de timpul de reîncărcare a capacității distribuite între poartă și canal Constantele de timp ale procesului de reîncărcare a acestei capacități cu o rezistență externă scăzută în circuitul de poartă limitează intervalul de frecvență de funcționare al unui tranzistor cu efect de câmp de poartă izolat la frecvențe de aproximativ GHz, adică, în principiu, astfel de tranzistori pot funcționa până la aproximativ aceleași frecvențe ca și tranzistoarele bipolare Caracteristica principală a tranzistoarelor cu efect de câmp este o rezistență de intrare foarte mare Componenta activă a acestei rezistențe poate ajunge la ohmi Prin urmare, tranzistoarele cu efect de câmp sunt utilizate în circuite care au și rezistențe mari § DISPOZITIVE SEMICONDUCTOR CU COMUNICARE Un dispozitiv de cuplare de sarcină (CCD) este un dispozitiv semiconductor care are un număr mare de porți (structuri MIS) strâns distanțate și izolate de substrat, sub care pachetele de informații ale purtătorilor de sarcină minoritari pot fi transferate în dren, fie injectate din stiva , sau care apar în substrat datorită absorbției radiației optice Structura și principiul de funcționare al dispozitivelor cuplate la sarcină Să luăm în considerare principiul de funcționare al unui CCD folosind exemplul unui circuit de registru cu deplasare în trei cicluri, care poate fi reprezentat ca o structură a unui tranzistor MIS cu multe porți (Fig) , A) Acest dispozitiv este format din trei secțiuni Prima - secțiunea de intrare - include o sursă cu o regiune p + sub ea și o poartă de intrare care acționează ca o cheie pentru a controla mișcarea găurilor din regiunea de difuzie p + a sursei la primul puț de potențial A doua - secțiunea de transfer - constă dintr-un număr de porți care controlează potențialul la interfața siliciu-dioxid de siliciu Aceste porți sunt interconectate prin două Tensiunile de la porțile secțiunii de transfer au forma unor impulsuri de diverse amplitudini, care se înlocuiesc între ele într-o permutare ciclică (Fig , , e) Cu o astfel de schimbare a tensiunii la poartă unsprezece aJ t st n de tip pachetul de încărcare a găurilor în puțurile de potențial ulterioare atunci când potențialele de pe electrozii de poartă se schimbă; r - citirea unei unități logice ieșirea dispozitivului în timpul extragerii găurilor din puțul de potențial în regiunea p+ a drenului; e - înregistrarea unui zero logic în absenţa unui potenţial negativ la poarta de intrare * pax se deplasează la ieșirea dispozitivului, antrenând pachete de purtători de încărcare - găuri A treia - secțiunea de ieșire - include o tranziție p-p a drenului Această tranziție este deplasată în direcția opusă și este concepută pentru a extrage găurile din puțurile potențiale potrivite pentru aceasta (Fig , d) Lăsați tensiunea u·· să fie aplicată porții de intrare la ciclul inițial de funcționare, suficientă pentru a forma un canal conducător sub poarta de intrare (IИ·· >IИpar) Dacă, în același timp, există o tensiune negativă suficient de mare pe prima poartă a secțiunii de transfer, adică dacă există un put de potențial adânc pentru găuri sub prima poartă a secțiunii de transfer, atunci găurile vor părăsi sursa , trec prin canalul de sub poarta de intrare și se acumulează în puțul de potențial de sub prima poartă a secțiunii de transfer (Fig ,) Tensiunea la poarta de intrare și·· este eliminată la începutul următorului pas de modificare a tensiunilor la porțile secțiunii de transfer Prin urmare, canalul conductor de sub poarta de intrare dispare Așa se înregistrează informații (de exemplu, o unitate logică), care corespunde unei anumite încărcături de găuri QI acumulate în puțul de potențial de sub prima poartă ca urmare a injectării din

sursă Rețineți că pentru a scrie informații corespunzătoare unui zero logic, nu trebuie aplicată o tensiune negativă la poarta de intrare În acest caz, nu va exista nicio injecție de găuri din regiunea p + a sursei în puțul de potențial de sub prima poartă (Fig , e) și poate apărea în ea doar o încărcătură relativ mică de găuri QO, asociată fie cu generarea termică a purtătorilor de sarcină sau cu o gaură de potențial de epuizare incompletă pe ciclurile anterioare ale dispozitivului După modificarea tensiunilor de pe porțile secțiunii de transfer, tensiunea cea mai negativă va fi pe cea de-a doua poartă, astfel încât pachetul de găuri se va deplasa la puțul de potențial de sub cea de-a doua poartă a secțiunii de transfer (Fig , c) Odată cu următoarele cicluri de schimbare a tensiunii la porțile secțiunii de transfer, va avea loc o avansare suplimentară a pachetului de găuri la secțiunea de ieșire (Fig , d, e) Dacă nu există purtători de sarcină - găuri în puțurile de potențial potrivite pentru joncțiunea pn a drenului, atunci nu va exista nicio modificare a curentului în circuitul de scurgere Și numai în cazul în care găurile care conțin puțul potențial se apropie de joncțiunea pn a drenului, aceste găuri vor fi extrase și un impuls de curent va trece în circuitul de drenaj sau tensiunea de dren se va modifica (Fig , d) Parametrii CCD-urilor Trebuie remarcat faptul că CCD-ul este un dispozitiv în mod tipic dinamic și are limite inferioare și superioare ale frecvențelor de ceas ale impulsurilor de tensiune care alimentează secțiunea de transfer Limita inferioară a frecvenței de ceas este determinată de faptul că între puțul de potențial din apropierea suprafeței și restul volumului semiconductorului trec curenți, asociați cu generarea termică a purtătorilor de sarcină și, în principiu, nu diferă de curentul de extracție inversă prin joncțiune pn Acești curenți afectează nivelul zero logic, crescând încărcarea găurilor din puțurile de potențial goale În funcție de temperatură și proprietăți semiconductor, o acumulare vizibilă de găuri în potențialele goale nyh gropi pot apărea într-un timp de la sutimi la unități de secunde Prin urmare, limita inferioară a frecvenței ceasului CCD este de obicei de la câteva până la zeci de kiloherți Limita superioară a frecvenței de ceas este determinată de timpul fluxului de încărcare de la un puț de potențial la altul (de ordinul a câteva nanosecunde) Într-un timp mai scurt, întreaga încărcare nu are timp să treacă de la un potenţial puţ în altul Prin urmare, limita superioară a frecvențelor de ceas pentru CCD-uri este de obicei determinată de zeci de megaherți În intervalul de frecvențe de operare care sunt departe de limită, CCD-ul nu transferă complet încărcătura informațională de la un put potențial la altul Acest lucru se datorează fenomenelor de captare a purtătorilor de sarcină prin nivelurile de energie de suprafață ale capcanelor de captare Ca rezultat, în primul rând, sarcina totală a pachetului transmis de găuri scade, adică nivelul unității logice scade În al doilea rând, purtătorii de sarcină capturați de capcanele de captare și eliberați după ceva timp pot cădea în puțuri de potențial goale, deformând astfel cel mai logic nivel zero Pentru a reduce influența acestui efect, este necesar să ne asigurăm că densitatea stărilor de suprafață este cu aproximativ două ordine de mărime mai mică decât cea permisă în producția de tranzistoare MIS O altă metodă, mai simplă, de a trata efectul considerat este de a codifica zeroul logic nu prin absența sarcinii în puțul potențial, ci printr-o sarcină mică Această încărcare, în timp ce se deplasează de-a lungul secțiunii de transfer CCD, duce la umplerea majorității stărilor de suprafață, care nu mai pot capta purtătorii de sarcină atunci când trec printr-un pachet de

găuri În acest caz, totuși, amplitudinea semnalului la ieșirea CCD scade A treia metodă de combatere a fenomenului de captură este utilizarea așa-numitului canal adânc În acest caz, prin introducerea de impurități corespunzătoare în stratul de suprafață al semiconductorului, se creează o distribuție a câmpului electric în apropierea suprafeței în care purtătorii de sarcină nu se deplasează în apropierea suprafeței, ci la o anumită adâncime (până la câțiva micrometri) Acest lucru reduce dramatic pierderile de captură media În plus, în CCD-urile cu un canal adânc, este posibilă deplasarea limitei superioare a frecvențelor de operare cu cel puțin MHz Cu toate acestea, dispozitivele cu un canal profund au o eficiență semnificativ mai mică de control al porții și, în consecință, o taxă de informare mai mică în comparație cu CCD-urile convenționale Pentru a evalua efectul considerat al captării purtătorului într-un CCD, se utilizează parametrul de eficiență a transferului de sarcină ll=(Ql -Q o);+ /(Q -Qo);, arătând ce fracțiune din sarcină este transferată de la unul potențialul bine i la altul i+ Valoarea eficienței transmisiei este de obicei apropiată de , deci este mai convenabil să se folosească factorul de pierdere (ineficiența transmisiei) Kп= - Pentru CCD-uri bune, factorul de pierdere este mai mic de - · Dependenţa de frecvenţă a factorului de pierdere este prezentată în fig Degradarea factorului de pierdere Se determină Kp în domeniul de frecvență joasă se reduce prin scăderea influenţei curenţilor inversi între puţul de potenţial şi restul semiconductorului (substratului) Creșterea factorului de pierdere la frecvențe înalte este asociată cu transferul incomplet de încărcare de la o sondă potențială la alta datorită schimbării rapide a takto-Fig Dependenţa de frecvenţă · · a impulsurilor de ieşire pe porţi final Valoarea factorului de pierdere Valoarea factorului de pierdere în domeniul CCD de frecvențe medii este determinată de efectul captării purtătorilor de sarcină prin capcane de captare După cum se poate observa, într-un CCD, taxa de informare este inevitabil pierdută Pentru a elimina acest dezavantaj, se folosesc circuite de regenerare, care sunt în esență amplificatoare Semnalul citit de la CCD este amplificat cu formarea corespunzătoare a nivelurilor sale, iar apoi informația este scrisă în lanțul CCD Pentru stocarea pe termen lung a informațiilor, lanțurile CCD sunt închise într-un inel Regenerarea încărcăturii informaționale poate fi combinată cu ieșirea de informații - apoi se obține un dispozitiv cu citire nedistructivă a informațiilor Aproape niciun curent de conducere nu trece prin electrozii de control ai porților CCD, deoarece porțile sunt izolate de conductor (substrat) printr-un strat de dielectric bun - dioxid de siliciu Dar în circuitul de electrozi al secțiunii de transfer, o oarecare putere este încă consumată pentru a transfera încărcătura de informații Această putere este proporțională cu frecvența ceasului Din punct de vedere al designului și tehnologiei, CCD-urile diferă de alte dispozitive prin faptul că au un număr mic de regiuni de difuzie și contacte metal-semiconductor, adică un număr mic de elemente structurale potențial nefiabile Acest lucru duce la un randament ridicat de dispozitive adecvate în fabricarea CCD-urilor, la costul scăzut și la fiabilitatea ridicată a acestora Utilizarea dispozitivelor cuplate la încărcare Până în prezent, au fost identificate trei domenii principale de utilizare a CCD-urilor:) dispozitive de stocare pentru calculatoare electronice;) dispozitive pentru conversia imaginilor în semnale electrice;) dispozitive pentru procesarea informațiilor analogice Dispozitive de stocare pe computer Conform principiului de funcționare, CCD-urile sunt dispozitive de stocare precum liniile de întârziere Dispozitivele de

memorie bazate pe CCD au fost aduse în producția industrială, deoarece se potrivesc cel mai bine naturii registrelor de deplasare CCD cu intrare și ieșire secvențială a informațiilor Informațiile circulă continuu într-un astfel de dispozitiv de memorie CCD cu regenerare La accesarea dispozitivului de stocare, informațiile înregistrate sunt recuperate cu sau fără regenerare, adică cu citire nedistructivă sau cu distrugerea informațiilor înregistrate Adesea, în modul de stocare, informațiile circulă prin dispozitiv relativ lent la o frecvență de ceas de ordinul a zece kiloherți, pentru a asigura doar regenerarea și pentru a nu cheltui multă putere pentru transferul de informații La accesarea dispozitivului de stocare, frecvența ceasului crește la limită - aproximativ câțiva megaherți, ceea ce asigură prelevarea rapidă a informațiilor înregistrate Dispozitive pentru conversia imaginilor în semnale electrice Principiul de funcționare al unor astfel de dispozitive se bazează pe faptul că, atunci când un CCD este iluminat într-un semiconductor lângă suprafața sa, se formează perechi de purtători de sarcină electron-gaură, care sunt separate de un câmp electric de potențial gropi de sub poarta secției de transfer Formată prin absorbția cuantelor de lumină purtătorii umplu puțurile de potențial proporțional cu iluminarea unei anumite regiuni a CCD Dacă atunci informațiile de lumină înregistrate sunt deplasate în mod obișnuit, atunci semnalul de la ieșirea CCD va repeta distribuția de iluminare, adică o linie de imagine va fi evidențiată Se poate selecta si urmatoarea linie etc In prezent au fost create camere transmisoare cu CCD-uri care ajung la standardul obisnuit de televiziune in ceea ce priveste rezolutia, inclusiv pentru televiziunea color Dispozitive pentru procesarea informațiilor analogice Prin utilizarea CCD-urile pot stoca și semnale analogice, dar în acest caz devine imposibilă regenerarea informațiilor înregistrate Cu toate acestea, memorarea simplă deschide și posibilități mari de utilizare a CCD-urilor, deoarece aceste dispozitive vă permit să controlați întârzierea transferului de informații Cea mai simplă opțiune pentru utilizarea CCD-urilor pentru procesarea informațiilor analogice s-a dovedit a fi linii cu întârziere fixă pentru receptoarele de imagini color de televiziune § VARIITATE DE SUPLIMENTE ROV CU CUPLARE DE ÎNCĂRCARE Principiul de funcționare a dispozitivelor cuplate la sarcină a fost luat în considerare în § folosind exemplul unui CCD cu o sursă de alimentare în trei cicluri la porțile secțiunii de transfer Designul unui astfel de dispozitiv are o serie de dezavantaje:) electrozii metalici - porți - trebuie amplasați la o distanță foarte mică unul de celălalt (aproximativ - microni), ceea ce îi face dificil de fabricat;) la o distanță mică între porți, un strat subțire de dioxid de siliciu situat între electrozi poate fi contaminat cu impurități din atmosferă;) intersecțiile inamovibile ale liniilor de metalizare pentru conectarea porților între ele complică tehnologia Aceste deficiențe pot fi parțial eliminate în alte modele de dispozitive similare Dispozitive cuplate cu încărcare Push-Pull Structura unui CCD push-pull sau a unui CCD cu un dielectric în trepte se distinge prin alternarea regiunilor semiconductoare (siliciu ~ ~ nya-) cu groase straturi groase și subțiri de dioxid de siliciu (Fig , a) Electrodul și > fiecare poartă a secțiunii de transfer O! r situate pe suprafața unor straturi groase și subțiri de dioxid de siliciu Când se aplică o tensiune pe poartă, sub ea se obține automat un puț de potențial asimetric, a cărui configurație asigură deplasarea direcționată a unui pachet de purtători de încărcare către un astfel de CCD mult mai ușoară decât Principiul transferului de informații este într-un CCD în trei

timpi Conectarea sarcinii ionice cu obloanele push-pull între ele în CCD-uri push-pull-transfer (, in) se poate realiza alimentarea nominală a porților secționale (Fig , a) Regiunile de difuzie cu conductivitate electrică de tip p, care sunt drenul pentru unul și sursa pentru alt tranzistor MIS, nu sunt conectate la o sursă de alimentare, spre deosebire de tranzistoarele MIS convenționale A! Si n-muna Taxa de informatii in formular un pachet de găuri poate fi stocat în regiuni de difuzie cu conductivitate electrică de tip p, deoarece bariera potențială a joncțiunii p-n dintre regiunea de difuzie și lingura sub-Dlor) împiedică răspândirea găurilor în modul de stocare, în ciuda unor deplasări înainte a acestei tranziții datorită sarcinii pozitive a pachetului de orificii în difuzie) p-regiuni (Fig ,) În modul de comunicare Orez Struk (pachet de găuri) al secțiunii de tur pentru fiecare transfer al doilea al CCD în lanțurile de poartă, este furnizat un impuls în rezistenții de tendință MIS negativ ai polarității suprafeței, amplitudinea co-(a) și diferența potențial în modul mai mare decât valoarea Ipor Din acest motiv, transferul motivului informațional sub fiecare a doua încărcare a obturatorului (, fără intersecții ale liniilor de metalizare, ceea ce simplifică tehnologia de fabricație a unor astfel de dispozitive CCD cu un număr de obturatoare ascunse (cu metalizare în două straturi) -UUZ În structura secțiunii de transfer a unui astfel de dispozitiv, unele dintre porți sunt realizate din siliciu policristalin (sau dintr-un metal refractar, cum ar fi molibdenul) În golurile dintre porțile de siliciu pe suprafața stratului de dioxid de siliciu sunt amplasate obloane metalice (Fig), care sunt separate de porți siliciu policristalin stratificat dioxid de siliciu depus după crearea porţilor de siliciu policristalin Într-o astfel de structură, este posibil să se reducă distanța dintre electrozii de poartă la o valoare egală cu grosimea stratului de dioxid de siliciu CCD pe lanțuri de tranzistoare MOS Structura secțiunii de transfer a unor astfel de CCD-uri este un lanț de tranzistoare MIS cu circuite de control push-pull În semiconductor apare un canal Datorită asimetriei locației electrodului metalic în raport cu regiunile de difuzie, fiecare a doua regiune de difuzie se află sub un potențial negativ mare, ceea ce asigură mișcarea direcționată a găurilor de la o regiune de difuzie la alta, adică la un puț de potențial mai adânc (Fig , c) Astfel, principiul de funcționare a CCD-urilor pe lanțuri de tranzistoare MIS este similar cu principiul de funcționare a CCD-urilor din alte modele și structuri care au fost luate în considerare mai devreme Diferența dintre CCD-urile de pe lanțurile de tranzistoare MIS și alte CCD-uri este că structura secțiunilor lor de transfer ~ are un număr destul de mare de joncțiuni pn, ceea ce o face mai puțin perfectă din punct de vedere tehnologic Încărcare de suprafață tranzistor Cea mai simplă structură a unui tranzistor cu sarcină de suprafață constă dintr-un substrat de siliciu și trei electrozi izolați unul de celălalt și de substrat (Fig) Primul și al treilea electrod pot fi ascunși De-a lor h, z de obicei scoarță din siliciu policristalin sau un metal refractar (de exemplu, molibden) Când un potențial negativ este aplicat primului sau al treilea electrod din semiconductor, sub electrodul corespunzător, Puț de potențial de tip Si n pentru purtătorii minori Si jumatate kr st / corpuri - gauri Informațiile sub forma unui pachet de găuri pot fi introduse în acesta Orez Structura peste- gaură potențială prin iluminare T-încărcare-încărcare trans- Astfel, primul și al treilea electrod ai încărcăturii de sub formațiune, împreună cu zonele semiconductorului de sub rezistor, atunci când sunt stocați de primul electrod de către acești

electrozi, pot îndeplini funcțiile de recepție și stocare a unei sarcini de informație Al doilea electrod acționează ca o poartă - atunci când i se aplică un potențial negativ, se formează un canal care conectează puțurile de potențial de sub primul și al treilea electrod În acest caz, sarcina informațională poate curge de la puțul de potențial, de exemplu, sub primul electrod către puțul de potențial de sub al treilea electrod, dacă potențialul celui de-al treilea electrod este mai negativ Ca și în cazul CCD-urilor cu alte modele, în modul static de funcționare al unui tranzistor cu sarcină de suprafață, o sarcină parazită se acumulează într-un puț de potențial gol datorită generării termice a purtătorilor de sarcină, adică un astfel de dispozitiv nu poate funcționa într-un mod static Întrebări de control Ce tipuri de tranzistoare cu efect de câmp există? Cum, cu ajutorul unui tranzistor cu efect de câmp, energia este convertită dintr-o sursă de putere relativ puternică a circuitului de ieșire în energia electrică ezitare? de ce proprietățile și caracteristicile tranzistoarelor de câmp ar trebui descrise printr-un sistem de ecuații în care curenții sunt funcții de tensiuni și nu viceversa? Ce factori fizici pot influența natura dependenței curentului de scurgere de tensiunea la drenul unui FET cu o joncțiune de control? Ce fenomene fizice care apar într-un tranzistor cu efect de câmp limitează gama de frecvență de funcționare a acestui dispozitiv? Care este diferența dintre structurile tranzistoarelor MIS cu canale induse și încorporate? Cum afectează această diferență caracteristicile statice? transmisie și care sunt parametrii specifici acelor și altor tranzistori cu efect de câmp? Care este principiul de funcționare al dispozitivelor cuplate la sarcină? Care sunt diferitele tipuri de structuri de secțiune de transport CCD? Care este semnificația parametrilor principali ai unui CCD? Ce factori influențează eficiența transferului de încărcare a informațiilor într-un dispozitiv cuplat la sarcină? Cum și de ce depinde factorul de pierdere pe frecvența impulsurilor de ceas care alimentează secțiunea de transfer a CCD-ului? Care sunt principalele aplicații ale CCD-urilor? capitol circuite integrate Mllf \ po "m: ~ prsh ika este o direcție științifică și tehnică de electronică, domeniul de aplicare-ÏrobLb'my de cercetare, proiectare și fabricare de circuite și dispozitive electronice microminiaturale extrem de fiabile și economice cu ajutorul commiii sa fizice, chimice, circuite si alte metode Prima sarcină a microelectronicii este de a crea cele mai fiabile circuite și dispozitive electronice Aceasta sarcina se rezolvă în principal prin utilizarea unor principii noi calitativ pentru fabricarea echipamentelor electronice, adică prin refuzul utilizării elementelor discrete ale echipamentelor electronice și prin crearea de circuite integrate în care se formează elemente active (tranzistoare, diode), elemente pasive (rezistoare, condensatoare) și elemente de conectare ale circuitului electronic apare la suprafață sau în volumul unui cristal semiconductor sau pe suprafața unui ajutor dielectric într-un singur ciclu tehnologic Numărul minim de conexiuni în circuit face posibilă creșterea dramatică a fiabilității echipamentelor microelectronice Tocmai acesta este ceea ce depășește contradicțiile complexe dintre cerințele crescute pentru fiabilitatea echipamentelor electronice și complicația rapidă a acestuia A doua sarcină a microelectronicii este reducerea costurilor circuitelor și dispozitivelor electronice Această problemă este rezolvată prin formarea unor structuri de diferite elemente, conexiuni interelementale și plăci de contact pentru multe circuite integrate pe o placă semiconductoare relativ mare sau pe un substrat dielectric într-un

singur ciclu tehnologic, urmată de împărțirea în cristale sau, respectiv, plăci de circuite integrate În același timp, este posibilă eliminarea multor operațiuni tehnologice iraționale, reducerea numărului de conexiuni în circuit, excluderea etanșării separate a elementelor individuale și reducerea semnificativă a numărului de operațiuni de asamblare care sunt necesare în fabricarea elementelor discrete și a acestora asamblare într-un circuit Aceste avantaje ale circuitelor integrate devin mai semnificative pe măsură ce devin mai complexe și numărul de elemente din ele crește Odată cu soluționarea acestor două cele mai importante probleme ale microelectronicii, crearea și utilizarea microcircuitelor integrate cri-conduce la o scădere bruscă a masei și volumului echipamentelor electronice în comparație cu masa și volumul echipamentelor bazate pe elemente discrete, precum și în ceea ce privește scăderea consumului de energie Reducerea suplimentară a masei și volumului circuitelor integrate este considerată o sarcină de importanță secundară Un microcircuit integrat (microcircuit) este un mini, electronic și: ~ diviziune, IgyuL-nyayuschie o anumită funcție de rebrazoing, procesare a semnalului și (sau) pompare a informațiilor oe g ~ "puncte de vedere III h Densitatea de ambalare a unui circuit integrat este raportul dintre numărul de elemente ale unui circuit integrat și volumul unui circuit integrat, excluzând volumul de pini Un alt parametru care caracterizează gradul de complexitate al unui circuit integrat sau numărul de elemente conținute în acesta este gradul de integrare Dacă un microcircuit integrat conține până la elemente, inclusiv, atunci se numește microcircuit integrat de gradul I de integrare; peste până la de elemente - al doilea grad de integrare; peste până la de elemente - al treilea grad de integrare etc Un microcircuit integrat care conține de elemente sau mai multe fabricate folosind tehnologia bipolară sau de elemente sau mai multe fabricate folosind tehnologia MIS, se numește circuit integrat mare (BIS) § C~dSSIFICAREA MICROCIRCUITULUI INTEDRAL Circuitele integrate sunt clasificate în funcție de tehnologia de fabricație, scopul funcțional și alte caracteristici După design și caracteristicile tehnologice, se disting circuitele integrate semiconductoare și hibride Integrarea semiconductorilor y~-lea microcircuit -e - ID; microcircuit integrat, toate elementele și conexiunile între elemente! tu! si ~neny in ,me pe Iupper!semiconductor osgi Principalele elemente active ale circuitelor integrate semiconductoare pot fi fie tranzistoarele bipolare, fie tranzistoarele cu efect de câmp, care sunt utilizate de obicei ca tranzistoare MIS cu un canal indus Prin urmare, se disting circuitele integrate bipolare și MIS Elementele unui circuit integrat bipolar trebuie izolate unele de altele pentru a exclude interacțiunea parazitară Metodele de izolare sunt discutate în § În legătură cu particularitățile tranzistoarelor MIS, elementele MIS ale circuitelor integrate nu au nevoie de izolare specială unele de altele Conexiunile elementelor individuale între ele, necesare pentru funcționarea circuitului, sunt efectuate folosind condensatori subțiri Rezistor tranzistor fAl J s п+ P S п п п SI chestii aJ fulgi de nea Pn ucmop DACA p-vrei Oh) Orez Variante ale structurilor circuitelor integrate semiconductoare cu diferite elemente pasive (a,) și circuitul echivalent al acestor structuri (c) de benzi metalice depuse pe suprafața oxidată a cristalului Exemple de structuri de circuite integrate bipolare sunt prezentate în fig Un exemplu de microcircuit integrat MIS este un dispozitiv cuplat la sarcină, discutat în § Un circuit integrat hibrid este un circuit integrat, o parte din care poate fi izolat ca produs independent în ceea ce

privește cerințele de testare, acceptare, livrare și operare O parte a unui circuit integrat hibrid care poate fi izolată ca produs independent se numește componentă de circuit integrat (spre deosebire de un element care este realizat inseparabil dintr-un cristal de circuit integrat semiconductor sau dintr-un substrat de circuit integrat hibrid) Un circuit integrat hibrid poate include ca componente nu numai tranzistoare sau diode, ci și circuite integrate semiconductoare întregi Elementele pasive ale circuitelor integrate hibride sunt de obicei fabricate pe substraturi sital, ceramice sau din sticlă prin aplicarea diferitelor filme dielectrice, rezistive și metalice Conexiunile între elemente și intercomponente, precum și plăcuțele, sunt realizate pe același substrat Un exemplu de circuit integrat hibrid este prezentat în fig Proiectarea și fabricarea circuitelor integrate hibride este adecvată pentru rezolvarea: Pentru sarcini speciale, private, cu relativ mici cantitatea de resturi necesară Fig Structura unui circuit integrat hibrid al cărui circuit echivalent este produse Designul este prezentat în fig , c rezistențe de film și condensatorii pe un substrat dielectric pot fi efectuate rapid, iar fabricarea acestor elemente nu necesită echipamente scumpe ~ Dacă un circuit integrat hibrid constă din mai multe circuite integrate semiconductoare, atunci caracteristica sa distinctivă poate fi, dimpotrivă, multifuncționalitatea Producția unor astfel de circuite integrate hibride trebuie să fie produsă în serie În funcție de scopul lor funcțional, toate microcircuitele integrate sunt de obicei împărțite în analogice și digitale, un microcircuit integrat interactiv (microcircuit analogic) este un microcircuit integrat conceput pentru a converti și procesa semnale care se modifică conform legii unei funcții continue Circuitele analogice în general și circuitele integrate analogice în special se bazează pe cele mai simple etape de amplificare Folosind multe cascade, ei creează diverse amplificatoare, stabilizatoare de tensiune și curent, convertoare de frecvență, faze, durate, generatoare de semnale sinusoidale, dreptunghiulare și de altă natură, precum și alte circuite Un circuit integrat digital (circuit digital) este un circuit integrat conceput pentru a converti și procesa semnale care se modifică conform legii unei funcții discrete Circuitele integrate digitale se bazează pe chei de tranzistori care pot fi în două stări stabile: deschis și închis Utilizarea cheilor tranzistorului face posibilă crearea diverselor circuite logice, declanșatoare și alte circuite integrate Circuitele integrate digitale sunt utilizate în dispozitivele discrete de procesare a informațiilor pentru calculatoare electronice (calculatoare), sisteme de automatizare etc § METODE DE IZOLARE PENTRU ELEMENTELE INTEGRALE MICROCIRCUIT Toate elementele circuitelor integrate semiconductoare și componentele circuitelor integrate hibride, realizate în volumul unui cristal, trebuie izolate unele de altele pentru a exclude interacțiunea parazită dintre ele Excepție fac tranzistorii MIS, așa cum sa menționat deja Pentru separarea elementelor individuale folosind izolarea joncțiunii p-n polarizate invers și uneori izolarea dielectrică Izolarea elementelor tranziție electron-gaură Principiul unei astfel de izolare este că pentru fiecare element din cristal se formează propria sa așa-numită insulă, înconjurată de o joncțiune p-n, care este deplasată în direcția opusă în timpul funcționării microcircuitului Curentul de scurgere al unei astfel de izolații nu depășește de obicei - A O joncțiune electron-gaură care izolează elementele individuale eu\I\ A) Si p-tip polițiștii unui circuit integrat semiconductor unul de celălalt pot fi create în diferite moduri, dintre care mai mult de o duzină au fost

dezvoltate în prezent Luați în considerare cele mai comune dintre ele - epitaxială plană cu SI de tip n hepitaxiaiІнно clloiiJ difuzia de separare (vezi Fig) În primul rând, un strat epitaxial este crescut pe o placă de siliciu cu o conductivitate electrică de tipul opus tipului de conductivitate electrică a vracului semiconductorului, adică se creează o joncțiune epitaxială pn pe întreaga zonă a plachetei Orez Formarea unei insule de siliciu Apoi, se realizează acoperirea obișnuită cu conductivitate electrică, etape p ale tehnologiei plane: tip oxid pe un substrat de siliciu monocristal cu electro-leșiere a suprafeței epitaxiale Conductivitate de tip p a unei pelicule plane, depunerea unui fotorezist, prin metoda epitaxială cu iluminarea sa printr-o mască - difuzie de separare a fotomască lon, deschiderea ferestrelor în cremă de dioxid ion, difuzia locală a acceptorilor prin întregul strat epitaxial către substratul cu conductivitate electrică de tip p (Fig , a) sau alte dispozitive semiconductoare Pentru a îmbunătăți unii parametri și caracteristici ale tranzistoarelor, înainte de creșterea stratului epitaxial, poate fi efectuată difuzia locală suplimentară a impurității donor folosind planar- tehnologie pentru a crea straturi aliate ascunse (p + straturi) Drept urmare, sub colecționarul viitorului al tranzistorului, apare o regiune bine conducătoare, ceea ce duce la o îmbunătățire a caracteristicilor tranzistoarelor Izolație dielectrică Metoda de izolare dielectrică are, de asemenea, multe opțiuni Luați în considerare metoda de izolare a elementelor cu dioxid de siliciu Pe fig arată secvența operațiilor la utilizare cercetarea acestei metode: oxidarea monocristalelor o placă înaltă de siliciu (Fig , a); fotolitografie; gravarea canelurilor în siliciu prin ferestre deschise în dioxid de siliciu - adâncimea canelurilor este de aproximativ microni (Fig ,); reoxidarea siliciului la temperatură ridicată sau aplicarea de dioxid de siliciu în alt mod - grosimea stratului de dioxid este de aproximativ micron (Fig , c); crescând pe un strat de dioxid de siliciu siliciu policristalin cu o grosime de um prin pirolitic, de exemplu pozițiile silanului (Fig , d); măcinarea sau gravarea din partea opusă a monocristalului siliciu înainte de separarea insulei (Fig , e) Metoda de izolare dielectrică permite obținerea unei bune izolații atât pentru curent continuu, cât și pentru curent alternativ, deoarece capacitatea asociată stratului de oxid poate fi foarte mică (pF / mm cu un strat de dioxid de µm grosime) Tensiunea de avarie pentru izolația dielectrică se dovedește a fi mult mai mare în comparație cu tensiunea de defalcare pentru izolația cu o joncțiune pn (peste V) V Q IJ SIO S[de tip n g J S de tip n di SI polycristopi Orez Urmare principalele etape tehnologice ale formării insulelor de siliciu monocristalin pe un substrat de siliciu policristalin sunt eu-și oxidarea monocristalului izo- dielectric latii: siliciu chimic; - etch turnarea canelurilor în siliciu placa prin fereastră în stratul de dioxid de siliciu; c - oxidarea repetată a siliciului; d - acumularea de policristalin siliciu; d-coboara- forjare a monocristalului siliciu înainte de separarea insulei- kov Principalul dezavantaj al acestei metode de izolare este costul ei ridicat comparativ cu cel planar-epitaxial § ELEMENTE ACTIVE Ca elemente active ale circuitelor integrate, se folosesc de obicei diverse structuri de tranzistori, formate în cristale de siliciu folosind metode de tehnologie plană Tranzistoarele circuitelor integrate pot diferi nu numai în structură, ci și în principiul de funcționare tranzistor bipolar Tranzistorul bipolar este un element activ comun în circuitele integrate moderne Structura unui tranzistor bipolar în circuite integrate (inte- lili unsprezece tranzistor tral) diferă de structura

unui tranzistor discret prin izolarea de substrat Un alt oso; Acest lucru se datorează faptului că ieșirea din regiunea colector a tranzistorului integrat este efectuată pe suprafața superioară a cristalului Prin urmare, pentru a reduce rezistența de volum a zonei colectorului, înainte de creșterea epitaxială, substratul este de obicei subdopat în acele locuri în care se vor forma structuri de tranzistori, adică se creează un strat p + ascuns (Fig) Cu toate acestea, chiar și în prezența unui strat n+ ascuns, rezistența regiunii colectoare a unui tranzistor integrat se dovedește a fi mai mare decât rezistența analogă a unui tranzistor discret, deoarece stratul n+ ascuns este separat de electrodul colector printr-un -rezistenţă Orez Structura unui tranzistor bipolar cu un strat ascuns al regiunii colectoare Acesta este cu un strat p + (a) și topologia duce la o oarecare deteriorare a electrozilor de frecvență ai acestui tranzistor proprietățile tranzistorului integrat ( ) ra din cauza creșterii constantei de timp a circuitului colector (timp de reîncărcare a capacității de barieră a colectorului) Prin urmare, frecvențele de tăiere frp ale tranzistoarelor bipolare din circuitele integrate nu depășesc de obicei MHz În acest caz, este de asemenea necesar să se țină seama de faptul că capacitatea de ieșire a tranzistorului integrat constă nu numai din capacitatea de barieră a joncțiunii colectorului, ci și din capacitatea de barieră a joncțiunii izolatoare dintre regiunea colectorului tranzistorului integrat iar restul cristalului În plus, datorită rezistenței crescute a regiunii colectorului, tranzistorul integrat are o valoare crescută a tensiunii între colector și emițător în modul de saturație Tranzistorul integrat Ikenas diferă de un tranzistor discret similar fabricat folosind aceeași tehnologie plană într-o dimensiune mult mai mică Acest lucru se explică prin faptul că într-un tranzistor planar discret trebuie să existe plăci de contact W pentru cablul de conectare ape emițătoare, de bază și colectoare Dimensiunea plăcuțelor de contact trebuie să fie de cel puțin IOOX µm Într-un circuit integrat, plăcuțele sunt necesare doar pentru a conecta cablurile de la întregul circuit Elementele individuale ale microcircuitului integrat sunt interconectate prin conexiuni între elemente în formă de benzi metalice subțiri și înguste (câțiva micrometri) Baza integralei bipolare microcircuitele alcătuiesc tranzistoare de tip p-p-p, care sunt cauzate de comoditatea de a forma exact p-p-p-structuri p și parametri ceva mai buni ai tranzistorilor p-p-p integrati în comparație cu parametrii integralei dintre ele sunt tranzistoare de tip p-n-p Ideea este că pentru a se forma În cazul regiunilor emițătoare puternic dopate ale tranzistoarelor de tip n-p-n, se utilizează de obicei difuzia fosforului, care are o solubilitate ridicată în siliciu și un coeficient de difuzie relativ mic Astfel, pentru a forma un tranzistor p-p-p într-un circuit integrat care conține tranzistori p-p, este, de asemenea, necesar să se efectueze o difuzie suplimentară a unui acceptor cu o solubilitate limită care depășește solubilitatea limită a fosforului Și astfel de acceptori sunt practic absenți Prin urmare, principala opțiune acceptabilă pentru un tranzistor integrat de tip p-n-p este așa-numitul tranzistor orizontal sau lateral (Fig) Pentru formarea sa, nu este necesar să se introducă operații tehnologice suplimentare, deoarece regiunile p ale emițătorului și colectorului său sunt obținute simultan la crearea regiunii p a bazei unui tranzistor de tip p-p-p Cu toate acestea, tranzistorul orizontal p-n-p se dovedește a fi lipsit de derive datorită dopării uniforme a regiunii sale de bază, stratul epitaxial Grosimea părții active a bazei tranzistorului orizontal este relativ

mare Toate acestea conduc la proprietăți de frecvență mediocre ale unui tranzistor orizontal: frecvența sa de tăiere nu depășește, de obicei, câteva zeci de kov megahertz Din structura unui tranzistor orizontal (Fig) este clar că pentru a obține un emițător sau un coeficient de transfer de curent de bază mai mare, este necesar ca aria părții inferioare a regiunii emițătorului să fie mică în comparație cu zona părților laterale ale acestei regiuni Aceasta înseamnă că regiunea emițătorului trebuie să fie cât mai îngustă posibil (lățimea ferestrei în stratul de dioxid de siliciu pentru difuzia acceptoarelor ar trebui să fie de , µm) Tranzistorul orizontal trebuie să aibă aceleași tensiuni de defalcare ale joncțiunilor emițătorului și colectorului Transferul coeficienții ar trebui să fie, de asemenea, curentul emițătorului apropiat cu pornirea normală și inversă a unui astfel de tranzistor, deoarece regiunile emițătorului și colectorului sunt identice ca proprietăți Structura orizontală facilitează implementarea unui tranzistor multi-colector Pentru a face acest lucru, este suficient pentru a împărți regiunea colectorului inelar în mai multe părți și a furniza cabluri separate din fiecare parte - de la fiecare colector Coeficientul de transfer de curent pentru fiecare colector va fi, desigur, de un număr corespunzător de ori mai mic decât pentru un singur colector, dar toți colectorii vor acţionează "sincron", iar sarcinile din toate circuitele colectoare vor fi separate electric Tranzistorul multi-colector se dovedeşte a fi convenabil pentru unele circuite integrate digitale Tranzistor bipolar cu diodă Schottky Tranzistorul bipolar din circuitele integrate digitale îndeplinește de obicei funcția de comutator și funcționează fie în modul de saturație, fie în modul de întrerupere tot timpul În modul de saturație, purtătorii de sarcină minori se acumulează în baza tranzistorului, precum și în regiunea colectorului (vezi §) Procesele de acumulare a purtătorilor minoritari și resorbția lor ulterioară în timpul transferului tranzistorului în modul de tăiere sau în starea oprită sunt asociate cu un proces relativ lent de difuzare a purtătorilor de sarcină minoritari Inerția acestor procese determină viteza de comutare a tranzistorului din starea pornit în starea oprită și invers, adică viteza circuitului Pentru a accelera procesul de acumulare și resorbție a purtătorilor de sarcină minoritari, este recomandabil să se limiteze acumularea acestora Acest lucru poate fi realizat prin derivarea joncțiunii colectorului tranzistorului cu o diodă Shatky, adică o diodă cu o joncțiune electrică de redresare între metal și semiconductor (vezi §) Structura unui astfel de tranzistor integrat și circuitul său echivalent sunt prezentate în fig Electrodul de aluminiu formează o tranziție ohmică cu regiunea p a bazei, iar tranziția dintre electrodul de aluminiu și regiunea p de rezistență relativ mare a colectorului se dovedește a fi rectificatoare Din cauza inegalității funcțiilor de lucru ale electronilor din aluminiu și siliciu cu conductivitate electrică de tip n și ca urmare a tratamentului chimic al suprafeței cristalului de siliciu, la contact apare o barieră de potențial cu o înălțime de aproximativ , eV pentru electroni (Fig , a), care este oarecum mai mic la e li aj) Orez Structura unui tranzistor cu o diodă Schottky (a) și circuitul său echivalent ( ) Orez Diagrama energetică a joncțiunii de redresare dintre electrodul de aluminiu și regiunea n de înaltă rezistență a colectorului (a) și joncțiunea ohmică dintre aluminiu e, gktrode și regiunea puternică, Igirovaniyu n+-a emițătorului (b) de tranzistorul de siliciu al înălțimii barierei de potențial la joncțiunea colectorului Prin urmare, cu polarizarea directă a joncțiunii colectorului și, în consecință, cu polarizarea

directă a diodei Schottky, partea principală a curentului direct al colectorului va trece prin dioda Schottky Acest curent este asociat cu mișcarea electronilor din regiunea n a colectorului la electrodul metalic și nu este însoțit de injectarea de găuri în regiunea n a colectorului Astfel, în regiunea de înaltă rezistență a colectorului, practic nu există nicio acumulare de purtători de sarcină non-primari (Fig) În plus, datorită înălțimii mai mici a barierei de potențial la joncțiunea Schottky în comparație cu înălțimea barierei de potențial la joncțiunea colectorului, pentru aceiași curenți continui de colector, va exista o tensiune directă mai mică la joncțiunea colectorului, ceea ce corespunde la o cantitate mai mică de purtători de sarcină minori acumulați în baza tranzistorului în modul de saturație (Fig) Ca urmare, timpul de disipare într-un tranzistor cu o diodă Schottky este mult mai scurt (mai multe e k p,p ~ p,p e k p+ p p p+ ~ p+ P p p+ un J o J alte zone ale tranzistorului în timpul funcționării acestuia în modul de saturație: a - în structura unui tranzistor plan convențional; - în structura unui tranzistor similar cu o diodă Schottky conectată în paralel cu joncțiunea colectorului de nanosecunde) decât timpul de disipare într-un tranzistor cu o structură similară, dar fără o diodă Schottky shunt Rețineți că barierele de potențial pot apărea și la contactul electrozilor de aluminiu cu regiunile n+ puternic dopate ale emițătorului și colectorului, dar grosimea lor se dovedește a fi atât de mică încât electronii pot trece prin astfel de bariere de potențial înguste aproape nestingheriți de tunel (vezi Fig , b) Astfel, la contactele electrozilor de aluminiu cu regiunea emitatorului si cu partea puternic dopata a regiunii colectoare se obtin tranzitii ohmice, iar formarea lor si formarea unei tranzitii de redresare Epor), electronii, dobândind energie suplimentară care depășește LE (cm Fig), se deplasează în văile laterale și devin "grele" Dacă în acest caz nu există încă o ionizare de impact vizibilă, atunci concentrația totală de electroni rămâne neschimbată și egală cu concentrația de echilibru: pi + n = po Indicând mobilitatea electronilor "uşoare" ci, mobilitatea electronilor "grei" ci , scriem expresia pentru densitatea de curent prin cristalul semiconductor după cum urmează: La câmpuri electrice slabe (E ale anodului, se obține un deficit de electroni, ceea ce echivalează cu formarea unei anumite sarcini pozitive, constând din donatori ionizați necompensați (Fig)) Astfel, se formează un domeniu, format din două straturi: stratul de pe partea catodului are o sarcină negativă din cauza unui exces de electroni "grei", stratul de pe partea anodului are o sarcină pozitivă din cauza lipsei de electroni Domeniul are propriul său câmp electric EAom îndreptată în aceeași direcție cu câmpul creat de tensiunea externă Ca urmare, pe măsură ce domeniul se formează, câmpul din acesta crește, iar în afara domeniului scade, adică viteza de mișcare a electronilor "grei" în interiorul domeniului crește și viteza de mișcare a electronilor "ușori" în exterior domeniul scade La un moment dat, viteza de mișcare a electronilor "grei" (viteza domeniului) se dovedește a fi egală cu viteza de mișcare a electronilor "ușori": v, = V sau µIEI = = u E , unde v este viteza de mișcare a electronilor în afara domeniului; v este viteza electronilor din domeniu, care corespunde cu viteza domeniului de la catod la anod Este evident că vi :S IT IT T IT IT IT TIT T" c " ": c~~ n II! ë г · ; ^ XIT T II! - :T II! IT T : т " : s :IT• : : s: : Oo: ë X ' o C' : ~CQ t : : I : -j : ; s: ; ; , eV) Cu o bandă interzisă mai mică a semiconductorului original, cuantele de energie eliberate în timpul recombinării purtătorilor de sarcină corespund regiunii infraroșii a radiației Astfel, diferența dintre dispozitivele semiconductoare pentru

afișarea informațiilor (reprezentarea vizuală a informațiilor) și diodele emițătoare de infraroșu este numai în contrast cu materialul semiconductor original Dacă recombinarea electronilor neechilibrați și a găurilor introduse în joncțiunea electrică rectificatoare sau în regiunile adiacente acesteia în timpul trecerii unui curent continuu a avut loc numai cu emisia de fotoni, atunci randamentul cuantic intern (raportul fotonilor emiși la numărul de perechi recombinate de purtători) ar fi % Cu toate acestea, o parte semnificativă a evenimentelor de recombinare se poate termina cu eliberarea de energie sub formă de cuante elementare de vibrații termice - fononi Astfel de tranziții ale electronilor între nivelurile de energie sunt numite non-radiative Relația dintre tranzițiile radiative și neradiative depinde de o serie de motive, în special, din structura benzilor de energie ale unui semiconductor, prezența impurităților care pot crește sau scădea probabilitatea tranzițiilor radiative Dintre materialele semiconductoare stăpânite în prezent, cei mai buni din punct de vedere al randamentului cuantic intern sunt compușii GaAsi-xPx la x = , Intervalul de bandă al acestor compuși crește de la , la x = la , eV la x = , În emițătorii semiconductori din arseniura de galiu, adică la x = în sistemul indicat de compuși, randamentul cuantic intern atinge valori apropiate de % Când se folosesc alte materiale semiconductoare, randamentul cuantic intern este uneori doar de câteva procente, dar chiar și la astfel de valori, radiația este suficientă pentru utilizare practică Tehnologia de proiectare și fabricație Chiar și cu un randament cuantic intern ridicat, randamentul cuantic extern al emițătorilor semiconductori se dovedește a fi semnificativ mai mic datorită absorbției fotonilor în semiconductor înainte de a ieși în spațiul înconjurător și din cauza pierderilor datorate reflexiei interne totale a fotonilor incidente pe limita de sticla sau r l plan aJ oJ dd Orez Structuri ale emițătorilor semiconductori incoerenți: a - planar plat; - emisferic; în - naya plană plată cu o acoperire semisferică transparentă secțiunea semiconductorului și atmosfera înconjurătoare la un unghi care depășește unghiul critic de reflexie internă totală 'Pcr = sunt sin (/ n,), unde n, este indicele de refracție al semiconductorului De obicei n,/n,sr , unde n și nrcp sunt indicii de refracție ai radiației electromagnetice în semiconductor și mediul care înconjoară emițătorul semiconductor (pgsr = pentru aer) Cu toate acestea, în emițătorii semiconductori cu structură emisferică, pierderea fotonilor ca urmare a absorbției crește oarecum, deoarece lungimea drumului lor de la locul de origine până la suprafața cristalului crește Toți emițătorii cu semiconductori cu structură emisferică au o eficiență cuantică externă care este cu un ordin de mărime mai mare decât cea a emițătorilor cu un design plat Mult mai simplă este tehnologia de fabricare a emițătorilor semiconductori cu o acoperire semisferică (sau parabolica) transparentă din diverse materiale plastice cu un indice de refracție ridicat pentru a crește unghiul critic de reflexie internă totală în semiconductor Principala metodă de formare a joncțiunilor pn și heterojoncțiilor în crearea emițătorilor semiconductori pe bază de arseniură de galiu GaAs, fosfură de galiu GaP, soluții solide ale acestor compuși GaAsi-xPx și alți compuși de tip Al Vv este metoda de creștere epitaxială De obicei, aceasta este epitaxie în fază lichidă, uneori este epitaxie din fază gazoasă Pentru a forma joncțiuni p-n în carbură de siliciu SiC, se utilizează metoda difuziei impurităților și, uneori, metoda creșterii epitaxiale Una dintre caracteristicile interesante ale carburii de siliciu este politipismul său, adică existența mai multor modificări

cristaline care diferă, în special, în banda interzisă Stabilitatea fizico-chimică ridicată a carburii de siliciu și coeficienții de difuzie relativ scăzuti ai impurităților din aceasta creează condițiile prealabile pentru fabricarea emițătorilor semiconductori foarte stabili pe baza acestui material Cu toate acestea, tehnologia de fabricare a monocristalelor de carbură de siliciu și tehnologia de formare tranzițiile electrice de rectificare din aceste monocristale sunt complexe În plus, nu este posibil să se obțină un randament cuantic ridicat în emițătoarele semiconductoare cu carbură de siliciu De mare interes pentru fabricarea emițătorilor semiconductori este nitrura de galiu GaN, care are cel mai mare interval de bandă (LE = , eV) dintre compușii de tip IIIv, stăpâniți din punct de vedere tehnologic Energiile fotonice care pot fi excitate în acest material acoperă întreaga regiune vizibilă a spectrului Oricum, indiferent de metoda de obținere și dopare, nitrura de galiu are doar conductivitate electrică de tip n Prin urmare, pentru a obține radiații în timpul recombinării purtătorilor de sarcină neechilibrați, în acest caz, este necesar să se creeze o tranziție electrică de rectificare sub forma unei tranziții Schottky la contactul metalului cu nitrura de galiu Comparația eficienței luminiscenței diferitelor materiale ; arată că randamentul cuantic crește odată cu creșterea lungimii de undă Prin urmare, dacă percepția vizuală a informațiilor nu este obligatorie, un pic indie iconic ar trebui să se acorde preferință diodelor emițătoare de roșu în infraroșu (indicator digital) pe bază de arseniură de galiu Dispozitivele de afișare a informațiilor semiconductoare, în funcție de structură, design și, bineînțeles, scop, pot fi împărțite în diode emițătoare de lumină, indicatori de semne semiconductoare, cântare și ecrane (vezi Fig) O diodă emițătoare de lumină (LED) este un dispozitiv de afișare cu semiconductor care este o diodă Astfel, în structura unei diode emițătoare de lumină există o singură joncțiune electrică redresoare (Fig) sau un element radiant semiconductor Un element radiant semiconductor este o parte a unui dispozitiv semiconductor pentru afișarea informațiilor, constând dintr-un dispozitiv de protecție împotriva zgomotului și contacte pentru conectarea la un circuit electric Indicatorul de semne semiconductoare este un dispozitiv semiconductor pentru afișarea informațiilor ~ (ii, format din elemente radiante semiconductoare, concepute pentru a reprezenta informații sub formă de semne și organizate într-una sau mai multe cifre Un exemplu de proiectare a unui indicator de semn cu o singură cifră este prezentat în fig Structura acestui indicator de semn constă din șapte elemente radiante și un punct zecimal, adică opt joncțiuni pn într-un singur cristal semiconductor, care emit lumină atunci când curentul este trecut în direcția înainte Diverse combinații de elemente radiante, furnizate prin comutare externă, vă permit să reproduceți numerele de la la și punctul zecimal O scară cu semiconductor este un dispozitiv de afișare a informațiilor, constând din elemente radiante semiconductoare, concepute pentru a reprezenta informații analogice Structura de scară semiconductoare poate fi fie mai multe diode emițătoare de lumină situate de-a lungul unei linii, fie mai multe joncțiuni pn situate, de asemenea, de-a lungul unei linii pe un substrat comun +Unp O altă varietate a structurii scalei semiconductoare este o structură cu o geometrie controlată a câmpului luminos (Fig) rezistenţă relativ mare şi deci la aplicarea tensiunilor externe nu va exista echilibru cu electrozi Structura semi-potențialului Distribuție potențială Scara Vodnikov cu geometria controlată a cadranului luminos în regiunea p depinde de tensiune

câmpul (a) și distribuția căsătoriei aplicată potențialului de control de-a lungul celor slab aliate electrod (Fig ,) În consecință, în regiunea p, la curenți diferiți de curentul de control furnizat electrodului de control prin electrodul de control (b), tipul de tensiune depinde și de mărimea câmpului luminos al scalei semiconductoare Astfel de cântare semiconductoare pot fi folosite ca indicatori de reglare pentru receptoarele cu tranzistori, pentru înregistrarea informațiilor analogice pe film, ca scară pentru diferite instrumente de măsură și în alte scopuri Un ecran semiconductor este un dispozitiv de afișare cu semiconductor pentru afișarea informațiilor, constând din elemente radiante situate de-a lungul unei linii și care conține n linii de elemente radiante, destinat utilizării în dispozitive de afișare a informațiilor analogice și digitale Un exemplu de ecran semiconductor este dispozitivele de afișare a informațiilor semiconductoare AJ A ALZO I, care sunt produse, totuși, ca indicatori iconici Ele constau din de diode emițătoare de lumină discrete conectate într-o matrice (șapte rânduri de cinci diode și o diodă separat) cu conexiune încrucișată și permit reproducerea numerelor și literelor Principalele caracteristici la parametri Luminozitatea emisiei Luminozitatea radiației este un parametru al dispozitivelor semiconductoare pentru afișarea informațiilor Unitatea de luminozitate în sistemul SI este candela pe metru pătrat (cd / m) - luminozitatea sursei de radiație, fiecare metru pătrat al suprafeței radiante a cărei intensitate luminoasă este egală cu o candela în această direcție De remarcat că la O, ttKtt v,llll / Bm g t t-: -, , o o, f -+- -G-+*' Orez Vizibilitatea relativă K și V absolută a unui observator fotometric standard în funcție de lungimea de undă a radiației, măsurătorile luminii, strict vorbind, nu sunt complet obiective Principalul: "dispozitiv" cu care puteți măsura cantitățile de iluminare, în cele din urmă, este ochiul uman Eficacitatea impactului luminii asupra ochiului uman este determinată de o valoare specială, care a primit denumirea de vizibilitate Vizibilitatea V este raportul dintre fluxul luminos F (adică puterea estimată de ochiul nostru) și puterea corespunzătoare adevărată, totală a energiei radiante Fe: V = F / Fe Pe fig Figura arată dependența vizibilității de lungimea de undă, așa cum este determinată de Comisia Internațională pentru Iluminare (CIE) Sensibilitatea ochiului este maximă la o lungime de undă de , microni Pentru un observator fotometric standard, W de energie radiantă la sensibilitatea maximă a ochiului corespunde la lm Raportul dintre vizibilitatea luminii la o lungime de undă dată Vl și vizibilitatea maximă Vshah se numește vizibilitate relativă: K=Vl/Vshah Astfel, emițătorul, care își dă toată energia doar sub formă de radiație cu lungimea de undă de , microni, are cea mai mare luminozitate și eficiență din punctul de vedere al ochiului uman Totuși, emițătorii semiconductori sunt adesea folosiți pentru a transmite informații în forma impulsurilor de radiație care ajung la receptorii de radiații cu caracteristici spectrale "I" care diferă semnificativ de caracteristicile spectrale ale vizibilității ochiului uman În acest caz, luminozitatea radiației se poate dovedi a fi un parametru complet inutil Deci, pentru diode cu emitere infraroșu, principalul parametrul este puterea totală de radiație în wați sau miliwați la un anumit curent direct Caracteristica de luminozitate Emițătoarele semiconductoare cu o joncțiune electrică de redresare au o relativă rezistență scăzută atunci când această tranziție este activată în direcția înainte Prin urmare, astfel de emițători ar trebui considerați dispozitive de curent alimentate de surse sau generatoare de curent În

consecință, caracteristica de luminozitate a dispozitivelor de afișare a informațiilor cu semiconductor este dependența luminozității de curentul care trece prin dispozitiv Este de dorit să aibă foarte proporționalitatea luminozității radiației de la trecere curent, care va corespunde invarianței randamentului cuantic sau invarianței raportului de recombinare radiativă și neradiativă acționează cu o modificare a curentului Un analog al caracteristicii de luminozitate pentru diodele emițătoare de infraroșu este dependența puterii radiației de curentul care trece Caracteristica spectrală este dependența puterii radiației de lungimea de undă a oscilațiilor electromagnetice emise (Fig) În prima aproximare, compoziția spectrală a radiației ionul poate fi caracterizat prin culoarea strălucirii dispozitivelor semiconductoare pentru afișarea informațiilor, iar diodele emițătoare de infraroșu - prin lungimea de undă a radiației la maximul caracteristicii spectrale Dar pentru mai multe detalii, desigur, caracteristica spectrală Parametrii emițătorilor semiconductori ca elemente ale unui circuit electric sunt determinați de caracteristica curent-tensiune Decalaj /Vmax J, mA , J , um , O diverse semiconductori materiale kovo arseniură și fosfură de galiu ( ), fosfură de galiu ( ) și carbură de siliciu ( ) băț Diferențele dintre ramurile directe ale caracteristicilor I-V ale emițătorilor semiconductori din diferite materiale sunt cauzate în primul rând de diferența de bandă interzisă și, în consecință, de înălțimea barierei de potențial la joncțiunea pn (Fig) Ramurile inverse ale CVC nu prezintă interes practic, deoarece emițătoarele semiconductoare cu o joncțiune electrică de redresare ar trebui să funcționeze numai atunci când sunt pornite în direcția înainte Cu toate acestea, trebuie avut în vedere faptul că tensiunile de defalcare ale semiconductorilor emițătoarele cu tranziție electrică redresoare nu depășesc câțiva volți Inerția emițătorilor semiconductori este caracterizată de timpul de creștere a impulsului de radiație și timpul de dezintegrare impulsul de radiație, care se măsoară în mod obișnuit între niveluri de radiație de , și , din amplitudinea impulsului de radiație Acești timpi sunt de obicei unități sau zecimi de microsecundă Astfel, timpii de creștere și de scădere ai impulsului de radiație se dovedesc a fi parametri nesemnificativi pentru dispozitivele de afișare cu semiconductori destinate indicației vizuale, deoarece inerția ochiului uman este destul de mare (aproximativ ms) Dimpotrivă, pentru diodele emițătoare de infraroșu, care sunt concepute pentru a procesa informații fără vizualizare, timpii de creștere și de scădere ai impulsului de radiație pot fi unul dintre parametrii principali § EMITĂTOARE ELECTROLUMINESCENTE DE PULBERE Principiul de funcționare Emițătoarele de pulbere electroluminiscente sunt una dintre varietățile de dispozitive semiconductoare emițătoare care utilizează electroluminescența unui electroluminofor (vezi §) Un emițător de pulbere electroluminiscentă este un sistem multistrat format dintr-un substrat de sticlă, pe care un electrod conductor transparent format din oxizi ai diferitelor metale (SnO , In , CdO etc), un strat de electroluminofor și un dielectric protector strat ca lac sau Fig Structura unei pulberi electroluminiscente dintr-un strat subțire de dioxid sau oxid emițător: siliciu (Si , SIO) și al doilea electro- - substrat de sticlă, - pro-trode (Fig) electrod pupilar; - strat de electroluminofor; - protector Unul dintre cele mai comune strat; - electrod metaCClic Cel mai comun electroluminofor este sulfura de zinc ZnS, activată pentru a produce o strălucire strălucitoare cu impurități de cupru, mangan și alte elemente Granulele sau policristale de sulfură

de zinc sunt ținute împreună printr-o legătură dielectrică Deoarece boabele individuale de pulbere de sulfură de zinc sunt separate prin dielectric cu un strat de legare caustică, condensatoarele electroluminescente pot funcționa numai la o tensiune alternativă, adică excitarea electroluminoforului are loc sub influența unui câmp electric Sub acțiunea tensiunii aplicate, atomii de impurități ai electroluminoforului sunt ionizați fie ca rezultat al tunelului de electroni de la nivelurile de impurități la banda de conducție (ionizare electrostatică), fie ca urmare a ionizării prin impact într-un câmp electric puternic în straturile de suprafață epuizate ale boabe de sulfură de zinc După excitarea straturilor de suprafață ale boabelor electroluminoforului, are loc procesul de luminescență a electroluminoforului - recombinarea purtătorilor de sarcină cu eliberarea de energie în exces sub formă de cuante de lumină Odată cu recombinarea radiativă, apare și recombinarea neradiativă, în care excesul de energie este eliberat sub formă de cuante de energie termică Culoarea radiației este determinată de banda interzisă a electroluminoforului și de adâncimea nivelurilor de energie ale capcanelor de recombinare din banda interzisă e Durata procesului de strălucire (afterglow) depinde de durata de viață a purtătorilor de sarcină minoritari și de prezența capcanelor de captare în electroluminofor, care pot crește semnificativ durata de viață efectivă a purtătorilor Principalele caracteristici si parametrii Unul dintre cei mai importanți parametri ai unui emițător de pulbere electroluminiscentă este luminozitatea efectivă la o anumită frecvență a unei tensiuni alternative și la o anumită valoare a acestei tensiuni, sau Z densitatea curentului in, to / m> Luminozitatea efectivă a electroluminii - emitatoare de pulbere minescenta -!OkHz , tel depinde de tensiunea aplicată (Fig) Caracteristica de luminozitate este neliniară, deoarece procesul de creștere a concentrației în exces a purtătorilor de sarcină în timpul ionizării de impact și în timpul efectului de tunel este caracterizat de dependențe de putere de tensiune (sau de puterea câmpului electric) Neliniaritate mare a luminozității-Fig Luminozitatea caracteristicilor caracteristice se dovedește a fi utilă în crearea de ecrane cu matrice electroluminiscente și convertoare de imagine, deoarece face posibilă obținerea unui contrast mai mare al imaginii și o rezoluție mai mare Abruptul caracteristicii de luminozitate este uneori estimat prin multiplicitatea modificărilor de luminozitate atunci când tensiunea pe emițătorul electroluminiscent este redusă cu jumătate din valoarea nominală Multiplicitatea modificărilor luminozității emițătorilor de pulbere electroluminiscente nu depășește Dependența luminozității efective de frecvența tensiunii alternative (Fig) se explică printr-o creștere a numărului de unde luminozitate pe unitatea de timp cu frecvența crescândă Spectrul de lumină emis de un emițător de pulbere electroluminiscentă este caracterizat de o lungime de undă corespunzătoare caracteristicii spectrale maxime a radiației Această lungime de undă depinde de diferența de energie dintre nivelurile între care are loc tranziția electronilor în timpul recombinării radiative § EMIȚĂTOARE ELECTROLUMINESCENTE DE FILM Principiu de funcționare Emițătorii de film electroluminiscent diferă de emițătorii de pulbere electroluminiscent în aceeași măsură doi electrozi în ei este o peliculă policristalină omogenă de electroluminofor, creată prin evaporare termică urmată de depunere în vid Deoarece nu există nicio legătură dielectrică în electroluminoforul din emițătorii de film electroluminiscent, aceștia pot funcționa și pe curent continuu

Excitarea unui electroluminofor, adică crearea unui neechilibru a stării straturilor de suprafață ale cristalelor de electroluminofor individuale se produce datorită injectării purtătorilor de sarcină prin bariere de potențial pe suprafața cristalelor de electroluminofor individuale în contact între ele și datorită injectării din electrozi În timpul recombinării purtătorilor injectați, excesul de energie poate fi eliberat sub formă de cuante de lumină Excitarea unui EL poate apărea și din cauza efectelor puternice de câmp (tunele și ionizare prin impact) în straturile de suprafață epuizate ale cristalelor EL Principalele caracteristici și parametri Grosimea filmului electroluminiscent în emițătoarele de film electroluminiscent este mică Prin urmare, tensiunile de funcționare ale unor astfel de emițători (V) este mult mai mică decât tensiunea de funcționare a emițătorilor de pulbere electroluminiscente din electroluminofor pulbere cu o legătură dielectrică Caracteristica luminozității emițătorilor de film electroluminiscent, adică dependența luminozității strălucirii de tensiunea aplicată, este neliniară, deoarece caracteristicile I-V ale acestor dispozitive sunt neliniare Datorită neliniarității mai mari a caracteristicilor de luminozitate ale emițătorilor de film electroluminiscent în comparație cu neliniaritatea caracteristicilor similare ale emițătorilor de pulbere electroluminiscente, emițătorii de film au o rezoluție mai mare, care este limitată de dimensiunea cristalelor electroluminiscente individuale (- - mm) Puterea de rezoluție a emițătorilor de film este, de asemenea, mare, deoarece peliculele subțiri practic nu împrăștie lumina Multiplicitatea modificărilor luminozității emițătorilor de film electroluminiscent ajunge la Emițătoarele de film electroluminiscente sunt inferioare emițătorilor de pulbere electroluminiscente în ceea ce privește eficiența și durata de viață Durata de viață scăzută caracteristică a majorității dispozitivelor semiconductoare policristaline este asociată cu acțiunea simultană a intensităților mari ale câmpului electric și a temperaturilor ridicate la contactele punctuale dintre cristalele semiconductoare individuale Un alt dezavantaj al emițătorilor de film electroluminiscent, precum și al emițătorilor de pulbere electroluminiscentă, este o mare răspândire a parametrilor Acest dezavantaj este, de asemenea, caracteristic tuturor dispozitivelor semiconductoare policristaline § LASERELE Principiul de funcționare > st paser este un dispozitiv semiconductor fără pompare, destinat conversiei directe a energiei z pektric și pi energia non-coerente - puroi de la zbârcire în energia coerente de la zgomot În laserele cu semiconductori sau în generatoarele cuantice optice (lasere cu semiconductori), radiația, ca în diodele emițătoare de lumină, generate de recombinarea electronilor și a găurilor Cu toate acestea, această recombinare în lasere se dovedește a fi în principal nu spontană, ci forțată (stimulată) De aceea sursele de radiații stimulate se numesc lasere* Radiația în timpul recombinării forțate este coerentă (vezi §), care este diferența fundamentală dintre laserele semiconductoare și diodele emițătoare de lumină Fenomenul de recombinare stimulată face posibilă controlul emisiei atomilor semiconductori excitați folosind unde electromagnetice și astfel amplificarea și generarea luminii coerente Funcționarea unui laser necesită predominarea recombinării radiative stimulate asupra absorbției cuantelor de lumină Predominanța radiației asupra absorbției sau a absorbției asupra radiației depinde de raportul dintre atomii excitați și neexcitați din cristalul semiconductor, adică de populația nivelurilor de energie ale semiconductorului În condiții de echilibru, la niveluri de energie mai

ridicate la orice temperatură a semiconductorului, numărul de electroni este mai mic decât la niveluri de energie mai scăzute În acest caz, este imposibil să se obțină amplificarea luminii ca urmare a recombinării stimulate Pentru predominarea recombinării forțate asupra absorbției cuantelor de lumină, este necesar ca nivelurile superioare de energie să fie mai umplute cu electroni decât cele inferioare semi-un conductor în care numărul de electroni dintr-unul dintre nivelurile de energie cu o energie mai mare este mai mare decât numărul de electroni dintr-un nivel cu o energie mai mică se numește stare cu populație inversă Absorbția cuantelor de lumină într-un semiconductor cu o populație inversă de niveluri de energie este mică, deoarece aproape nu există electroni în partea de sus a benzii de valență către care să poată fi transferată energia unei cuante de lumină Pe de altă parte, recombinarea forțată poate avea loc într-un semiconductor cu inversare a populației O populație inversată într-un semiconductor poate fi creată în diferite moduri:) prin injectarea purtătorilor de sarcină cu pornirea directă a joncțiunii p-n, care este utilizată în așa-numitele lasere de injecție;) prin excitație electronică, adică prin bombardarea semiconductorului cu un fascicul de electroni rapizi;) cu ajutorul pompei optice, adică prin excitarea atomilor semiconductori cu cuante de lumină de la un emițător puternic de lumină incoerentă sau coerentă;) prin utilizarea efectelor unui câmp electric puternic, adică înmulțirea în avalanșă a purtătorilor de sarcină sau tunelarea electronilor în timpul tranziției lor de la nivelurile de energie situate în apropierea vârfului benzii de valență la nivelurile de energie situate în apropierea fundului benzii de conducție De cel mai mare interes practic este prima dintre metodele enumerate pentru crearea unei populații inverse Prin urmare, să luăm în considerare laserele de injecție Tehnologia de proiectare și fabricare a laserelor de injecție Inversarea populației într-un laser de injecție cu o joncțiune p-n este mai ușor de obținut dacă una dintre regiunile structurii diodei este degenerată, adică conține o concentrație mare de impurități corespunzătoare Cu direct pornind joncțiunea pn, curentul continuu este format din două componente: electronică și orificiu Cu cât trece mai mult curent prin joncțiunea pn, cu atât mai marginal este îndeplinită condiția inversă a populației Curentul minim la care are loc predominant recombinarea forțată se numește curent de prag Dacă curentul care trece prin joncțiunea p-n este mai mare decât pragul, atunci joncțiunea p-n este un mediu de amplificare pentru propagarea luminii în planul joncțiunii p-n Numărul de evenimente de recombinare forțată poate fi crescut asigurându-se că fiecare cuantum de lumină trece de mai multe ori în planul de joncțiune pn Pentru a face acest lucru, două fețe opuse ale unui monocristal semiconductor sunt realizate strict paralele și lustruite cu grijă Pentru a asigura coeficientul de reflexie necesar de la capete, acestea nu pot fi metalizate, deoarece indicele de refracție ridicat al materialului semiconductor asigură reflectarea de la aceste capete până la % din quanta luminii După multiple reflexii de la capete lustruite / p a) z ~ p g O) Orez Structura unui laser de injecție cu semiconductor (a) și schema formării unei avalanșe de fotoni în cavitatea optică a laserului (b): - regiune activă cu inversiune a populației; - suprafețele reflectorizante ale unui cristal semiconductor iar trecerea multiplă corespunzătoare de-a lungul joncțiunii p-n, lumina părăsește semiconductorul (Fig) Cuantele de lumină care se deplasează strict perpendicular pe capetele cristalului pot trece de multe ori printr-o regiune activă cu o populație inversată și, prin urmare, pot crea o

avalanșă mare de cuante de lumină Celelalte două fețe laterale trebuie să fie teșite la un anumit unghi pentru a preveni generarea de lumină între ele (Figura) Acele cuante de lumină care au început să se miște nu de-a lungul joncțiunii p-n și nu perpendiculare pe capetele cristalului părăsesc regiunea activă cu populație inversă și nu provoacă recombinare forțată Orez Semi- injecție conductivă - laser pentru picioare: - placa de molibden - electrod inferior; - zona cu conductivitate electrica de tip n; - regiune activă cu populație inversă; - zona cu conductivitate electrica p - tip; suprafețe de capăt lustruite ale cristalului semiconductor; - electrod superior; - radiații p+ π p EF a) Fig Diagrama energetică a unui laser de injecție semiconductor cu heterojoncțiuni fără tensiune aplicată (a) și la o tensiune directă ( ) Pentru fabricarea laserelor de injecție se folosesc arseniură de galiu, soluții solide de arseniură de galiu-fosfură GaAsl-xPx, arseniură de indiu, fosfură de indiu și alte materiale semiconductoare Laserele de injectare cu arseniură de galiu sunt cele mai utilizate Piesa de prelucrat inițială pentru astfel de lasere este un singur cristal de arseniură de galiu, de formă care se apropie de un cub sau paralelipiped, cu laturile lungi de câteva zecimi de milimetru În arseniura de galiu dopată cu donatori (Te, Se etc), joncțiunea pn este de obicei creată prin difuzie de acceptori (Zn, Cd etc) Regiunile cu conductivitate electrică de tip p și p ar trebui să aibă concentrații ale impurităților corespunzătoare la care stările energetice ale electronilor și găurilor sunt aproape de degenerare Pentru a crea un contact nerectificator cu regiunea p, un singur cristal cu o structură de diodă este lipit pe o placă de molibden acoperită cu un strat de aur (Fig) Un strat de aliaj de aur cu cepeõpCWrt este depus pe suprafața regiunii p O inversare a populației poate fi creată mult mai ușor într-un laser cu injecție de semiconductor cu heterojoncțiuni (Fig) Regiunea de bază a unei astfel de structuri este alcătuită dintr-un semiconductor cu o bandă interzisă mai mică și o constantă dielectrică mai mare decât regiunile emițătorului Purtătorii de sarcină injectați în bază ajung în puțuri potențiale Diferența dintre indicii de refracție (permitități) ai regiunilor de bază și emițător duce la reflectarea internă totală a cuantelor de lumină asupra eterogenei rotranziții, adică zona de bază este în esență un far Toate acestea asigură densități de curent de prag semnificativ mai mici și eficiențe sau eficiențe mai mari ale laserelor de injecție cu heterojoncțiuni Principalele caracteristici si parametrii Densitatea curentului de prag depinde în mod substanțial de temperatura laserului de injecție: pentru laserele pe bază de arseniură de galiu, densitatea de curent de prag este de ordinul a A/cm la T = , K și de ordinul a A/cm la K Astfel, pentru a reduce densitatea curentului de prag, este necesară răcirea profundă a laserului de injecție Laserele de injecție care utilizează heterojoncțiuni, care au densități de curent de prag semnificativ mai mici, pot funcționa la temperatura camerei în regim continuu DF, -Caracteristica spectrală la-rel eo Z zero", precum și orice altă sursă > -+ -+ - lumina, este dependența intensității radiației (adesea în unități relative) de lungimea de undă (Fig) La curenţi scăzuti (sub prag) radiaţie~ tam-tam- care se datorează în principal recombinării spontane, este incoerentă Prin urmare, răspunsul spectral este larg, Fig Caracteristicile spectrale ale infraroșului adică, laserul funcționează ca o diodă emițătoare de lumină către o diodă fundamentală La curenți mari în arseniura de galiu cu o față întunecată de prag, intensitatea la o temperatură de K: radiația este mult mai mare, deoarece - la un

curent sub prag, radiația se dovedește a fi coerentă și valorile (modul de funcționare al diodei emitatoare); - cu un curent strict dirijat peste valoarea pragului laser) Radiația laser caracterizează distribuția spațială a intensității radiației Radiația laserelor semiconductoare are un unghi de divergență destul de mic (care nu depășește câteva grade) al fasciculului de lumină Dar conform acestui parametru, semi- laserele conductoare sunt semnificativ inferioare laserelor cu gaz și dielectrice în stare solidă, ceea ce este asociat cu dimensiunea mică a cristalului semiconductor și mai ales cu dimensiunea mică a regiunii active în care are loc recombinarea stimulată Eficiența unui laser de injecție cu semiconductor pe bază de arseniură de galiu ajunge la %, în timp ce valoarea randamentului cuantic intern poate ajunge la %, adică fiecare electron injectat creează un foton la recombinare cu o gaură În ceea ce privește eficiența, laserele cu injecție cu semiconductor sunt superioare laserelor dielectrice cu gaz și în stare solidă, în care este egală cu miimi și, respectiv, sutimi de procent Luminozitatea caracteristică a laserului, adică dependența intensului C-\"Și radiația de trecerea prin la- curentul zero (Fig), este o dependență aproape liniară în gama de curenți corespunzătoare predominanței recombinării spontane (modul de funcționare al diodei emițătoare de lumină) și predominanța recombinării stimulate (modul de funcționare al laserului) § FOTOrezistente Un fotorezistor este un rezistor semiconductor a cărui acțiune se bazează pe radiație semiconductoare tic o diodă pe bază de arseniură de galiu la diferite temperaturi Când fotorezistorul pax este iradiat cu fotoni într-o fotografie semiconductoare În stratul sensibil, apare o concentrație în exces de purtători de sarcină (vezi §) Dacă fotorezistorului i se aplică o tensiune, atunci o componentă suplimentară de curent va trece prin acesta - fotocurent, din cauza concentrației în exces de purtători Componenta electronică a fotocurentului şi IFp = abrLpcp-= abq(l -R)aTΠNΦ πμπE, unde a este grosimea stratului fotosensibil semiconductor; L este lățimea sa; - distanta dintre electrozi; R este coeficientul de reflexie; a este rata de absorbție; TJ - eficienta generarii cuantice; NΦ este numărul de fotoni incidenti pe o unitate de suprafață a stratului fotosensibil pe unitatea de timp Fotocurentului corespunde trecerii electronilor prin fotorezistor și prin circuitul extern IΦηίρ Numărul de electroni care apar în volumul stratului fotosensibil datorită absorbției fotonilor este egal cu aN(-R)alJN(r) Raportul dintre numărul de electroni care au trecut prin circuitul extern și numărul de electroni care au apărut în stratul fotosensibil se numește câștig fotorezistor: Kl \u d Iφπ / q -ab (J -R) a Chf "pcpE -" μ E aH (lR) allN(r) -aY (-R) allN(r) - Produsul mobilității electronilor și intensității câmpului electric este viteza de deplasare a electronilor, care poate fi reprezentat şi ca distanţa dintre electrozi împărţită la timpul de zbor al purtătorilor dintre electrozii Iprol De aceea, câştigul fotorezistorului poate fi exprimat şi sub următoarea formă: K = Tp / prol Dacă stratul fotosensibil semiconductor are impurități care sunt capcane de captare pentru purtătorii minoritari de sarcină (sensibilizarea sau detectarea impurităților), atunci capturarea purtătorilor minoritari de către aceste capcane poate crește semnificativ (cu mai multe ordine de mărime) durata de viață efectivă a purtătorilor majori neechilibrați În acest caz, durata de viață poate depăși semnificativ timpul de zbor al purtătorilor între electrozi Când unul dintre electroni ajunge la electrodul pozitiv, celălalt electron intră în stratul semiconductor de la electrodul negativ pentru a

menține neutralitatea electrică a volumului semiconductorului, în care a rămas necompensată capcană de captare încărcată pozitiv Astfel, absorbția unui foton poate face ca mulți electroni să treacă prin fotorezistor Introducerea de impurități sensibilizante, ducând la creșterea duratei de viață efective a purtătorilor principali, determină o scădere a vitezei fotorezistorului Amplificarea fotocurentului poate apărea și în prezența barierelor de potențial, de exemplu, pe suprafața cristalelor semiconductoare, dacă fotorezistorul este realizat pe bază de policristalin material semiconductor Barierele potențiale pot fi puțuri potențiale pentru purtătorii de încărcare minori În acest caz, va exista o amplificare a fotocurentului în fotorezistor prin analogie cu amplificarea fotocurentului în fototranzistor, care va fi discutată în § Tehnologia de fabricație și design Partea principală a designului fotorezistorului este un strat fotosensibil semiconductor, care poate fi realizat sub forma unei plăci semiconductoare monocristaline sau policristaline sau sub forma unui film semiconductor policristalin depus pe un substrat dielectric Sulfura de cadmiu, seleniura de cadmiu sau sulfura de plumb sunt utilizate în mod obișnuit ca material semiconductor pentru fotorezistoare Electrozii metalici sunt aplicați pe suprafața stratului fotosensibil Uneori, electrozii sunt depuși direct pe substratul dielectric înainte ca stratul semiconductor să fie depus Suprafața stratului fotosensibil semiconductor situat între electrozi se numește platformă de lucru Fotorezistoarele sunt realizate cu platforme de lucru de formă dreptunghiulară, sub formă de meandre sau sub formă de inel Zona locurilor de lucru ale diferitelor fotorezistoare este de obicei de la zecimi la zeci de milimetri pătrați Pe baza suprafeței platformei de lucru, puteți selecta corect dimensiunea fasciculului de lumină, puteți estima fluxul luminos la care ar trebui să funcționeze fotorezistorul etc Când utilizați fotorezistorul, se recomandă ca zona de lucru a acestuia să fie complet iluminată , deoarece efectul modificării rezistenței fotorezistorului este maxim Un substrat cu un strat fotosensibil semiconductor depus pe acesta sau o placă semiconductoare este plasat într-o carcasă din plastic sau metal Principalele caracteristici și parametri Caracteristicile curent-tensiune ale fotorezistorului sunt dependențele curentului luminos fe· la un flux luminos constant, precum și curentul de întuneric /them de tensiunea aplicată fotorezistorului (Fig) În domeniul de funcționare al tensiunii BAC a fotorezistoarelor la diferite valori ale fluxului luminos, acestea sunt aproape liniare Cu toate acestea, majoritatea fotorezistoarelor de film și a fotorezistoarelor cu un strat fotosensibil de material semiconductor policristalin, liniaritatea BAC este încălcată la mici tensiuni (caracteristica este super-liniară) Această neliniaritate asociat cu fenomene la contactele dintre ¿Hem tz;^===: : : = :t: : : boabe sau cristale semi-şi conductor La tensiuni joase se determină rezistența fotorezistorului Fotorezistența CVC se datorează în principal rezistenței torus: aceste contacte Tensiune aplicată - fără iradiere (în întuneric); zhenno la fotorezistor, cade în os- - sub iradiere nouă la contactele dintre boabele semiconductorului Prin urmare, se obține intensitatea câmpului electric la contacte mare chiar și la tensiuni joase pe fotorezistor În acest sens, odată cu creșterea tensiunii aplicate, rezistența contactelor scade fie din cauza efectelor unui câmp puternic (de exemplu, tunelarea prin bariere subțiri de potențial asupra contactelor), fie din cauza încălzirii regiunile de contact ale granulelor semiconductoare individuale Cu o creștere suplimentară a tensiunii, rezistența

fotorezistorului este deja determinată de rezistența de volum a granulelor semiconductoare și, prin urmare, va rămâne constantă, ceea ce corespunde secțiunii liniare a caracteristicii I-V La tensiuni înalte pe fotorezistor, BAC-ul se poate abate din nou de la liniar, devenind superliniar Superliniaritatea este asociată cu o creștere a temperaturii întregului strat fotosensibil datorită puterii mari degajate Lumina sau lux-amperul caracteristic fotorezistorului este dependența fotocurentului /F \u d Csv-Stem de iluminare sau de fluxul de lumină incident pe fotorezistor Fotorezistentele au de obicei sub-IF, -, - , caracteristica liniară a luminii mA (Fig) Subliniaritatea luminii t - - b oo~ caracteristicile sunt explicate prin părtinire număr de niveluri de demarcație, sau cvasi- -t , - , - - - Niveluri Fermi, pentru electroni și pentru găuri cu mărire: m abateri de la J stare de echilibru cu o creștere t - , - - nivel de marcare (cvasi-Valoarea Fermi pentru electroni) se deplasează - t-# l - - i deplasarea spre banda de conducție ca urmare a creșterii concentrației de electroni liberi, nivelul de demarcație a găurilor O lx rock) este mutat simultan la var Zona caracteristică a luminii datorită creșterii con- sistenței fotorezistorului centrarea orificiilor (vezi Fig) Datorită deplasării nivelurilor de demarcație, unele niveluri de capcane de captură devin niveluri de capcane de recombinare Odată cu creșterea concentrației capcanelor de recombinare, durata de viață a purtătorilor de sarcină scade, ceea ce este primul motiv pentru subliniaritatea caracteristicii luminii Modelele de creștere a fotocurentului de la iluminare sunt diferite pentru diferite fotorezistoare și sunt determinate de concentrația anumitor impurități în semiconductor și de distribuția nivelurilor de impurități de-a lungul benzii interzise a diagramei energetice a semiconductorului Al doilea motiv care duce la subliniaritatea luminii caracteristice fotorezistorului este o scădere a mobilității purtătorilor de sarcină cu creșterea iluminării datorită creșterii valorile concentrației atomilor ionizați într-un semiconductor și prin urmare datorită împrăștierii crescute a purtătorilor de sarcină de către atomii ionizați Într-o gamă îngustă de iluminare, dependența este adesea folosită pentru a aproxima caracteristica luminii IΦ=AEx , unde Lich - coeficienți care sunt constanți pentru un anumit fotorezistor în domeniul de iluminare selectat; E - iluminare Caracteristica spectrală a fotorezistorului este dependența fotocurentului de lungimea de undă a luminii incidente pe fotorezistor (Fig) La lungimi de undă mari, adică la energii scăzute ale fotonilor de lumină în comparație cu banda interzisă a unui semiconductor, energia cuantică este insuficientă pentru a transfera un electron din banda de valență în banda de conducție Prin urmare, pentru fiecare semiconductor și, în consecință, pentru fiecare fotorezistor, există o lungime de undă de prag (cel mai Orez Caracteristicile spectrale medii ale diferitelor fotorezistoare: - FSK; - FSD; -FSA; -SF mare), care este de obicei definită ca lungimea de undă corespunzătoare dezintegrarii fotocurentului cu % din partea lungimilor de undă mari La lungimi de undă mici, cu o scădere a lungimii de undă a luminii incidente pe fotorezistor, indicele de absorbție crește Prin urmare, adâncimea de penetrare a cuantelor de lumină în semiconductor scade, adică partea principală a purtătorilor de sarcină neechilibrați apare în apropierea suprafeței iluminate a stratului fotosensibil În acest caz, rolul recombinării de suprafață crește și durata medie de viață a purtătorilor de neechilibru scade Astfel, caracteristica spectrală are și o scădere la lungimi de undă mici Diferiți semiconductori au benzi interzise care variază de la

zecimi la eV Prin urmare, caracteristica spectrală maximă a diferitelor fotorezistoare poate fi în părțile infraroșu, vizibile sau ultraviolete ale spectrului electromagnetic Constanta de timp este timpul în care fotocurentul fotorezistorului se modifică după iluminare sau după întunecarea fotorezistorului cu % (e ori) față de valoarea stabilită Astfel, constantele de timp caracterizează viteza de reacție a fotorezistorului la o modificare a fluxului de lumină ~ ieșire, adică caracterizează inerția fotorezistorului Datorită faptului că rata de creștere a fotocurentului sub iluminare oarecum diferită de rata declinului său după întunecarea fotorezistorului, există constante de timp de creștere "n și dezintegrare • cn Valori numerice ale constantelor de timp ale diferitelor fotorezistoare de la zeci de microsecunde la zeci de milisecunde Constantele de timp sunt măsurate la o iluminare de lux, o temperatură ambientală de °C și o rezistență de sarcină inclusă în circuitul de măsurare, mai mică de kOhm Iluminarea la determinarea constantelor de timp este produsă de obicei dintr-o sursă de radiație cu o temperatură de culoare de K Toate aceste condiții sunt necesare la măsurarea constantelor de timp pentru unicitatea rezultatelor obținute, deoarece constantele de timp depind de concentrația capcanelor de captare și de viteza de umplere și golire a acestora, care, la rândul său, se modifică odată cu schimbările de iluminare, temperatură și alte condiții în care funcționează fotorezistorul Astfel, odată cu creșterea iluminării, numărul de capcane de captură scade și numărul de capcane de recombinare crește datorită divizării nivelului Fermi în cvasi-niveluri sau deplasării nivelurilor de demarcație (vezi Fig) Amandoua factorii conduc la o scădere a duratei de viață a purtătorilor de sarcină și, în consecință, la o scădere a constantei orice timp al fotorezistorului Pe măsură ce temperatura crește, probabilitatea de ionizare a capcanelor de captare crește, ceea ce înseamnă că acestea sunt golite mai repede și reducerea constantelor de timp Prezența unei inerții semnificative în fotorezistoare duce la faptul că odată cu creșterea frecvenței de modulare a fluxului luminos, valoarea efectivă a foto-curentului alternativ rezultat scade Frecvența maximă de modulare a fluxului luminos pentru fotorezistoare nu depășește zeci de kiloherți Rezistența la întuneric este rezistența fotorezistorului în absența luminii Rezistența la întuneric este de obicei determinată la s după ce fotorezistorul este întunecat, care anterior era sub iluminare de de lux Din cauza aceasta este inerția de golire a capcanelor de captare după încetarea iluminării De exemplu, pentru fotorezistoarele FSK- , raportul rezistențelor la întuneric măsurat după întunecare după s și după ore poate atinge trei ordine de mărime Sensibilitatea integrală specifică este raportul dintre fotocurent și fluxul luminos și tensiunea aplicată: Sensibilitatea se numește integrală, deoarece se măsoară atunci când fotorezistorul este iluminat cu lumină de compoziție spectrală complexă: de la o sursă de lumină cu o temperatură de culoare de K la o iluminare de lux Sensibilitatea integrată specifică a diferitelor fotorezistoare variază de la la mA / (V-lm) § FOTODIODE O fotodioda semiconductoare este o dioda semiconductoare al carei curent invers depinde de iluminare De obicei, diodele semiconductoare cu o joncțiune p-n, polarizate invers de o sursă de alimentare externă, sunt folosite ca fotodiode Când cuante de lumină sunt absorbite în joncțiunea p-n sau în regiunile adiacente ale cristalului semiconductor, se formează noi purtători de sarcină (perechi de electroni-pr la trecere ron-hole) Purtători minori care au apărut în regiuni adiacente joncțiunii p-n la o distanță care nu

depășește lungimea de difuzie difuzează către joncțiunea p-n și trec prin aceasta sub acțiunea unui câmp electric sau, din punctul de vedere al diagramei energetice, se derulează barieră de potențial (Fig) Prin urmare, curentul invers prin fotodiodă crește odată cu iluminarea Absorbția cuantelor de lumină direct în joncțiunea pn duce la un rezultat similar Ca urmare, atunci când fotodioda este iluminată, curentul invers prin ea crește cu o cantitate numită fotocurent (Fig) În domeniul de funcționare al tensiunilor inverse, când fotodioda este iluminată, curenții inversi sunt practic independenți de tensiunea aplicată, deși ramura inversă a CVC a fotodiodei în stare întunecată poate să nu aibă o secțiune de saturație a curentului Designul fotodiodei, desigur, ar trebui să prevadă necesitatea de a ilumina cristalul semiconductor, protejând în același timp acest cristal de alte influențe externe (Fig) Proprietățile fotodiodelor pot fi caracterizate prin parametri și dependențe similare cu cele ale fotorezistoarelor Cu toate acestea, fotodiodele au caracteristici distinctive semnificative Deci, caracteristica luminii fotodiodei, adică dependența fotocurentului de iluminare, corespunde proporționalității directe a fotocurentului de iluminare Acest lucru se datorează faptului că grosimea bazei fotodiodei este mult mai mică decât lungimea de difuzie a purtătorilor de sarcină minoritari Prin urmare, aproape toți purtătorii non-bazici care au apărut în bază ca urmare a generării de lumină sunt profitabile ajung la joncțiunea pn și participă la formarea fotocurentului Toate- În acest caz, pierderile purtătorilor de sarcină minoritari pentru recombinare în bază și pe suprafața bazei practic nu depind de iluminare, deoarece semiconductorul inițial conține o cantitate mică de impurități necontrolate care ar putea juca rolul de capcane de recombinare și de captare capcane Consecința liniarității luminii caracteristice fotodiodei este independența sensibilității integrale a fotodiodei față de valoarea aplicată Proiectarea fotodiodei într-o tensiune metalică cor-reversă Prin urmare, un început: de la parametrii principali ai fotodiodei - cristal semiconductor nu este o integrală specifică cu tranziția p-n; - sensibilitate la cristal, dar pur și simplu suport integral; - corp; - ieșire internă; -sensibilitate covariană: tub wai; - izolator de sticla; - piciorul corpului; - inel de lipit; - lentila de sticla O altă caracteristică a fotodiodelor și avantajul lor important față de fotorezistoare este inerția lor scăzută În general, inerția fotodiodelor poate fi afectată de trei factori fizici: timpul de difuzie sau deplasare a purtătorilor de sarcină neechilibrați prin baza td; timpul zborului lor prin tranziția p-n t ;; timpul de reîncărcare a capacității de barieră a joncțiunii p-n, caracterizat prin constanta de timp gSbar Timpul de difuzie al purtătorilor de sarcină prin baza unei fotodiode poate fi determinat în mod similar cu timpul de zbor al purtătorilor prin baza unui tranzistor folosind formulele ( ) sau ( ) În fotodiodele cu germaniu aliat, grosimea bazei este de µm și 'td ~ ns - Timpul de zbor al transportatorilor prin tranziția pn t;: : ; : ::b/Vmax, unde b este grosimea joncțiunii pn; Vmax este viteza maximă de deriva a purtătorilor de sarcină (vezi § ~ În germaniu și siliciu Vmax: : ; : : : · cm/s, grosimea joncțiunii pn, în funcție de tensiunea inversă și de concentrația de impurități în bază, este de obicei mai mică de µm În consecință, timpul de zbor al transportatorilor prin joncțiunea pn t; : : ; : : : , ns Constanta de timp a fotodiodei rCbar este determinată de capacitatea de barieră a joncțiunii pn, care depinde de tensiune, și de rezistența bazei fotodiodei la o rezistență de sarcină scăzută în circuitul extern

Rezistența de bază a fotodiodelor este mult mai mare decât cea a altor diode, deoarece contactul neredresator la baza fotodiodei este situat de-a lungul marginilor bazei și nu pe întreaga suprafață (Fig) Prin urmare, o scădere a grosimii bazei poate duce nu la o scădere, ci la o creștere a rezistenței bazei Constanta de timp a fotodiodelor rCbar se obține de ordinul nanosecundelor Astfel, inerția fotodiodelor aliate este determinată de timpul de difuzie al purtătorilor de sarcină prin bază În fotodiodele de difuzie, prin crearea unui câmp electric de accelerare în bază datorită distribuției neuniforme a impurităților, este posibil să se reducă timpul de zbor al purtătorilor prin bază la câteva nanosecunde În astfel de fotodiode, toți cei trei factori au aproximativ același efect asupra inerției Caracteristica spectrală a fotodiodelor: determinată și din partea lungimilor de undă mari de banda interzisă a materialului semiconductor original, la lungimi de undă scurte - de un indice mare de absorbție și o creștere a influenței recombinării suprafeței purtătorilor de sarcină cu o scădere a lungimii de undă a cuantelor de lumină Astfel, limita de fotosensibilitate pe lungime de undă scurtă a unei fotodiode depinde de grosimea bazei și de viteza de recombinare a suprafeței Prin reducerea acestor valori, este posibilă deplasarea semnificativă a limitei lungimii de undă scurte a fotosensibilității fotodiodelor către lungimi de undă mai scurte Poziția maximului pe caracteristica spectrală a unei fotodiode depinde puternic de gradul de creștere a coeficientului de absorbție într-un semiconductor dat Cu o creștere bruscă a coeficientului de absorbție cu o scădere a lungimii de undă a luminii incidente, de exemplu, în germaniu, poziția maximului este determinată de banda interzisă (Lmax = , µm) și practic nu depinde de grosime a bazei Dacă dependența coeficientului de absorbție de lungimea de undă este slabă, ca, de exemplu, în siliciu, atunci efectul de reducere a pătrunderii cuantelor de lumină în adâncimea semiconductorului și creșterea rolului recombinării suprafeței va fi mai slab odată cu scăderea lungimii de undă Prin urmare, maximul caracteristicii spectrale se poate schimba cu o modificare a grosimii bazei și a ratei de recombinare a suprafeței Astfel, caracteristica spectrală maximă a fotodiodelor de siliciu poate fi deplasată în intervalul de la , la µm prin schimbarea proiectării și tehnologiei de fabricație a acestora Fotodiode bazate pe tranziție metal-semiconductor În fig Pentru ca partea principală a cuantelor luminoase să pătrundă prin electrodul metalic superior , acesta grosimea ar trebui să fie mică (aproximativ nm pentru Au) Pierderea prin reflexie poate fi redusă prin utilizarea acoperirilor antireflex Principiul de funcționare al unei fotodiode bazat pe o joncțiune de redresare me-aJ un semiconductor înalt este similar cu principiul de funcționare al unei fotodiode cu o joncțiune p-n Cu toate acestea, există unele diferențe care afectează caracteristicile și parametrii Prima diferență este posibilitatea de a absorbi fotoni de lumină cu energie mai mică decât banda interzisă, pentru care) semiconductorul este transparent, în metalul electrodului superior Mai mult, dacă energia cuantumului luminii depășește înălţimea potenţial barieră, apoi excitat electro-Fig Structura fototronilor din metal se poate transforma într-o po-diodă cu o tranziție de redresare între metal și semiconductor printr-un semiconductor potențial (a) și o barieră energetică (Fig), oferind astfel o diagramă sa-get a acestui aspectul meu de fotocurent Prin urmare, structurile de la limita inversă a undei lungi a stresului spectral (b): - electrod subțire din metal transparent; - a doua caracteristică a fotodiodelor bazate pe electrodul de contact metal-semiconductor op-metal, este formată de

înălțimea tranziției barierei potențiale ohmice cu cristalul semiconductor la acest contact și este situată la lungimi de undă mai mari ale spectrului electromagnetic O altă diferență între fotodiodele considerate este că, odată cu scăderea lungimii de undă a cuantelor luminoase (cu creșterea energiei cuantelor) și cu creșterea indicelui de absorbție într-un semiconductor, cuantele luminoase continuă să fie absorbite în stratul de încărcare volumică , unde există un câmp electric Prin urmare, limita de undă scurtă a caracteristicii spectrale a fotodiodelor bazată pe tranziția metal-semiconductor este situată la lungimi de undă mai scurte ale spectrului electromagnetic Astfel, răspunsul spectral al unei fotodiode bazate pe o joncțiune metal-semiconductor este mult mai larg decât răspunsul spectral al unei fotodiode cu o joncțiune p-n din același semiconductor În plus, rezistența de bază a unei fotodiode bazată pe o joncțiune metal-semiconductor este mult mai mică: Prin urmare, constanta de timp t, s se dovedește a fi mică, iar inerția este determinată în principal doar de timpul de zbor al purtătorilor prin spațiu regiune de sarcină la joncțiunea metal-semiconductor de redresare Acest timp de zbor poate fi de ordinul , , ns, ceea ce face posibilă utilizarea fotodiodelor bazate pe o tranziție metal-semiconductor cu modularea cu microunde a fluxului luminos fotodiode bazate heterojuncție Diagrama de energie a unei heterojoncții polarizate invers este prezentată în fig Când o fotodiodă cu o astfel de heterojoncție este iluminată din partea unui semiconductor cu decalaj larg de cuante de lumină cu energie hv (LE >Pv>LE), lumina este absorbită în P, un semiconductor cu decalaj îngust Un semiconductor cu decalaj larg se dovedește a fi transparent la astfel de cuante de lumină Purtătorii de sarcină minoritari care apar în acest caz, trecând prin heterojoncțiune, creează un fotocurent Odată cu scăderea lungimii de undă a luminii incidente pe fotodiodă, indicele de absorbție al semiconductorului cu distanță îngustă crește Adâncimea de penetrare a cuantelor în acest semiconductor scade Generarea purtătorilor de neechilibru are loc numai în apropiere Heterojuncția energetică Diagrama Goethe La lungimi de undă mici ale suprajuncției incidente cu invers (hv ' > LE), cuante de lumină sunt absorbite în tensiune și cu un semiconductor cu decalaj larg Astfel, luminând-o cu cuantică, caracteristica spectrală a fotoenergiei (hv '> hv) a unei diode bazată pe o heterojuncție se dovedește a fi mai largă în comparație cu caracteristicile spectrale ale fotodiodelor bazate pe tranziții pn convenționale mi lumina cu diferite mișcări § FOTOCELELE SEMICONDUCTORE Principiul de funcționare O fotocelula semiconductoare este un dispozitiv semiconductor cu o joncțiune electrică de redresare, conceput pentru a transforma direct energia luminii în energie electrică Fotocelula funcționează fără surse externe de energie și este ea însăși o sursă de energie electrică Luați în considerare principiul de funcționare al unei fotocelule cu o joncțiune pn ca joncțiune de redresare Când fotocelula este iluminată, datorită absorbției cuantelor de lumină în joncțiunea p-n și regiunile semiconductorului care se apropie de joncțiunea p-n, se generează noi purtători de sarcină Câmpul electric de difuzie care există în joncțiunea pn produce o separare a purtătorilor de sarcină neechilibrați Cu alte cuvinte, din punctul de vedere al diagramei energetice a joncțiunii p-n (Fig), electronii neechilibrați rulează de pe poten-Pns Secțiunea- barieră cială și cad în regiunea n, găuri de neechilibru, dimpotrivă, în regiunea p Ca urmare a purtătorilor de sarcină, acumularea de electroni în regiunea n și găurile la bariera de potențial p-n-tranziție-în p-obDD între aceste regiuni ale ridicării în timpul absorbției ka ~ t diferență de

potențial suplimentară ~ cuante de lumină foto-EMF Acumularea de purtători de neechilibru în regiunile corespunzătoare nu poate continua la infinit, deoarece simultan cu acumularea de găuri în regiunea p și electroni în regiunea p, înălțimea barierei de potențial scade cu valoarea foto-EMF care a apărut Reducerea înălțimii barierei de potențial sau reducerea intensității câmpului electric total în joncțiunea pn înrăutățește "proprietățile de separare" ale joncțiunii Pe lângă componenta foto-EMF, care apare din cauza separării purtătorilor de sarcină de către câmpul electric al joncțiunii pn sau al altei bariere de potențial și care este principala în fotocelule, pot exista și alte componente Când un semiconductor este iluminat, apare un gradient de concentrație de electroni și găuri, care difuzează de la suprafața iluminată în adâncimea semiconductorului Dar coeficienții de difuzie ai electronilor și găurilor sunt diferiți Prin urmare, există o a doua componentă a foto-EMF (vezi §) În plus, dacă există capcane pentru captarea purtătorilor unui semn pe suprafața iluminată a semiconductorului, o a treia componentă a foto-emf apare ca urmare a difuzării în adâncimea semiconductorului purtătorilor de sarcină de semn opus S et Tehnologia de fabricație și design ! ! ! ! ! n Fotocelule curente sunt utilizate pe scară largă sub formă de baterii solare (un set de fotocelule P conectate electric) pentru transformarea energiei luminii solare direct în energie electrică gia, care alimentează instalațiile navelor spațiale De obicei în aceste scopuri este-Fig Structura unei fotocelule de siliciu, formata din fotocelule de siliciu, fabricata prin metoda difuziei-tranzitie electronica-gaura intr-un monoion de impuritati pe o placa de cristal de siliciu cu conductivitate electrica de tip p, este creata prin difuzia fosforului sau a antimoniului (Fig) Cu o concentrație mare de donatori (fosfor sau antimoniu) în stratul superficial de siliciu, conductivitatea regiunii n este ridicată Prin urmare, un contact neredresant cu această zonă poate fi realizat sub forma unui inel sau a unui cadru, lăsând întreaga suprafață a cristalului disponibilă pentru iluminare Principalele caracteristici si parametrii Caracteristici volt-amper Modul de funcționare al fotocelulei (mod de generare foto-EMF) la diferite fluxuri de iluminare sau lumină corespunde părților CVC situate în al patrulea cadran (Fig) Punctele de intersecție ale CVC cu axa tensiunii corespund valorilor foto-EMF sau tensiunilor în circuit deschis la diferite niveluri de iluminare Pentru fotocelulele cu siliciu, foto-/EMF este de , O, V Punctele de intersecție ale VAC cu axa curentului corespund valorilor curenților de scurtcircuit, care depind de aria joncțiunii electrice redresoare a fotocelulei Prin urmare, fotocelulele sunt comparate și evaluate-Ikr prin densitățile de curent de scurtcircuit Pentru fotocelulele din siliciu, densitatea curentului de scurtcircuit IkD la expunerea medie la soare este de mA / cm Conform caracteristicii curent-tensiune la diferite iluminări, fo- Fig - - Fotocelula BACH la diferit Tocell, puteți alege fluxurile optime de lumină reionică, bancul fotocelulei, adică sarcina optimă care cade pe rezistența fotonului, la care cea mai mare putere este eliberată în elementul de sarcină Modul optim de funcționare al celulei foto corespunde celei mai mari zone a dreptunghiului cu un vârf pe BAC pentru o anumită iluminare (Fig) Pentru fotocelule de siliciu la sarcina optima, tensiunea la sarcina este de , , V, densitatea de curent prin fotocelula este de mA / cm Caracteristicile luminii unei fotocelule sunt dependențele foto-EMF și ale curentului de scurtcircuit de fluxul luminos sau de iluminarea fotocelulei (Fig) Subliniaritatea caracteristicilor luminii este asociată cu o scădere a înălțimii

barierei de potențial cu acumularea de exces un număr de electroni în regiunea n și găuri în regiunea p Caracteristica spectrală Zo, s elementul este dependența curentului de scurtcircuit b It ~;;;;;;f~ scurtcircuit pe lungimea de undă f - - -l , lumină căzând spectral ha- l + ->f'- + + + D- ,Z caracteristicile fotocelulelor sunt similare cu caracteristicile spectrale , fotodiode realizate pe baza O! TO F, m din același semiconductor Maxim -'sch Caracteristicile caracteristice- spectrale ale luminii ale caracteristicilor crem ale fotocelulei: fotocelulele de nium aproape corespund - în caz de scurtcircuit; corespunde maximului spectralului - la ralanti determinarea energiei solare De aceea, celulele solare cu siliciu sunt utilizate pe scară largă pentru a crea celule solare Eficiența unei fotocelule este raportul dintre puterea maximă care poate fi obținută de la o fotocelulă și puterea totală a fluxului radiant incident pe suprafața de lucru a fotocelulei: rt=Pmax/P Principalele procese care conduc la o scădere a eficienței fotocelulelor includ reflectarea unei părți a radiației de la suprafață semiconductor, absorbția fotoelectric inactivă a cuantelor de lumină într-un semiconductor (fără formarea de perechi de purtători electron-gaură), recombinarea purtătorilor de neechilibru chiar înainte ca aceștia să fie separați de câmpul electric al unei tranziții electrice de redresare (în special pe suprafața un cristal semiconductor), pierderi de putere atunci când curentul trece prin rezistența de volum a fotocelulei de bază Ca urmare, la transformarea razelor solare în energie electrică, eficiența fotocelulelor de siliciu nu depășește % Cu toate acestea, poate fi îmbunătățit semnificativ folosind Telurura de cadmiu, arseniura de galiu și alte materiale cu o bandă interzisă puțin mai mare decât siliciul, precum și utilizarea fotocelulelor bazate pe heterojoncțiuni, sunt utilizate ca semiconductor inițial § FOTOTRANZISTOARE ȘI FOTOTIRISTORI Un tranzistor care răspunde la iradiere cu un flux unidirecțional și este capabil să amplifice simultan fotocurentul se numește fototranzistor Fototranzistoare bipolare Fototranzistorul bipolar poate fi inclus în circuit în diferite moduri Dacă aplicați o tensiune între bază și colector, deplasând joncțiunea colectorului în direcția opusă ~ și lăsând terminalul emițătorului neconectat la circuit, atunci o astfel de includere a unui fototranzistor bipolar nu va diferi în niciun fel de circuitul de comutare a fotodiodei Când cuantele de lumină sunt absorbite în regiunile de bază și colectoare, se formează perechi de purtători de sarcină neechilibrate (electroni și găuri) Purtători minoritari (găuri în baza p și electroni în colectorul p pentru j dintr-un tranzistor de tip p-p-p) difuzează către joncțiunea colectorului, sunt atrași de câmpul electric existent acolo în joncțiunea colectorului OJ și trec prin acesta, creând astfel un fotocurent /F· Cu toate acestea, un fototranzistor bipolar este de obicei utilizat la comutare pe Diagrama de energie a unui fototranzistor, care, conform schemei cu un emițător comun, se află într-o stare întunecată, să luăm în considerare principiul de funcționare a stării (a) și atunci când este iluminat, bipo că ieșirea de bază nu este conectată la circuit, adică curentul de bază este zero (/ B \u d O) În acest caz, purtătorii de sarcină minoritari, care trec prin joncțiunea pn a colectorului, creează același fotocurent / F Purtători principali neechilibrați - electroni în baza p, care a apărut datorită absorbției cuantelor de lumină de acolo și electronii care au venit la baza de la colector, ei se găsesc într-un fel de puț cu potențial (Fig) Acumularea de purtători de sarcină principale neechilibrați în bază scade înălțimea barierelor de potențial ale

joncțiunilor emițătorului și colectorului Datorită scăderii înălțimii barierei de potențial a joncțiunii emițătorului, injectarea găurilor de la emițător în bază crește (Fig ,) În consecință, și curentul colectorului crește Astfel, încărcarea suplimentară a purtătorilor principali de neechilibru acumulată în baza fototranzistorului bipolar asigură amplificarea fotocurentului, adică, la iluminare, curentul colector rezultat /f: :: ::::: -d-= -d-exp -m , buric Woo unde d este diametrul punctului de contact; B este coeficientul de sensibilitate la temperatură a straturilor de suprafață ale cristalelor de carbură de siliciu Apoi, rezistența statică a unui varistor, constând dintr-un lanț conectat în paralel, având, la rândul său, cristale de contact B legate în serie, B B B R = -Rkoh = -d exp -T ( ) a an Uoo Ecuația de echilibru termic pentru regiunile active varistorului (,) unde H este coeficientul de împrăștiere al regiunilor active; T este temperatura regiunilor active; To este temperatura mediului din jurul regiunilor active Din ecuația ( ), ținând cont de ( ), se pot obține caracteristicile I-V ale varistoarelor în formă parametrică: I= ~f Hb(T-To) exp!! (,) Andy~T' = yandHy;iT-To) exp(-~) (,) Ecuațiile ( ) și ( ) sunt incomode pentru calcularea circuitelor cu varistoare, deoarece conțin o serie de mărimi (a, B, d, H), valorile cărora sunt aproape imposibil de determinat direct Cu toate acestea, folosind aceste ecuații, puteți afla unele dintre cerințele pentru materialul sursă pentru fabricarea varistoarelor cu proprietățile dorite În plus, aceste ecuații fac posibilă stabilirea unei relații între diferiții parametri ai varistoarelor § tl l CARACTERISTICI Coeficientul de neliniaritate al varistorului este raportul dintre rezistențele statice R și r diferențiale la saaawHOM tensiune constantă pe varistor: RO dl (,) ~= =- dU Din ecuațiile ( ) și ( ) găsim rezistența diferențială a varistorului: dV dU / dT b (t -vt + vto) in (,) r=df=dr df=adny~ T +BT-BT exp-y Qt-H l r τ I - + - ' h-"'~'vH \ i + r- + i Jt-t-ri' +:s ; ;i : : : -' + -Y - f'r- +~~-/ + ' > |> i aJ Orez Dependențe calculate ale coeficientului de neliniaritate al varistoarelor din materiale cu diferite valori ale coeficientului de sensibilitate la temperatură B: a - de la tensiune; b - asupra temperaturii regiunii active Apoi, ținând cont de relațiile ( ) și ( ), coeficientul de neliniaritate al varistorului ~=~= t:+mar-mar (,) g T -WT+WTo Pe fig arată dependențele calculate ale coeficientului de neliniaritate de tensiunea și temperatura regiunilor active ale varistoarelor din materiale cu diferite valori ale coeficientului de sensibilitate la temperatură B a straturilor de suprafață ale cristalelor Pentru a determina poziția maximelor acestor dependențe, diferențiam ( ) în raport cu temperatură și echivalăm derivata cu zero Apoi obținem condiția T= To, în care coeficientul de neliniaritate are o valoare maximă: To+V (, O) ~max= To-V Din relația ( ) rezultă că la B To, atunci varistorul ar trebui să aibă o distorsiune diferențială negativă, iar coeficientul de neliniaritate va fi, de asemenea, negativ Pe baza acestor calcule (Fig ,), se poate concluziona că temperatura regiunilor active ale varistorului poate depăși temperatura mediului cu câteva sute de grade Prin urmare, pentru fabricarea varistoarelor cu parametri stabili, este necesar un material rezistent la căldură De aceea, carbura de siliciu, unul dintre cele mai rezistente la căldură, este folosită în producția de masă a varistoarelor În același timp, carbura de siliciu policristalină este un material foarte ieftin Principalele impurități din carbura de siliciu tehnică sunt azotul și aluminiul Energia de ionizare a acestor impurități în carbura de siliciu este scăzută (în special la o concentrație mare a impurităților

principale și compensatoare, care apare în carbura de siliciu tehnică), iar valoarea coeficientului de sensibilitate la temperatură B este în mod corespunzător mică Prin urmare, coeficientul de neliniaritatea varistorilor nu depășește b, ceea ce limitează posibilele aplicații ale varistorilor O creștere a temperaturii ambiante ar trebui să conducă la o scădere a coeficientului de neliniaritate Dependență estimată coeficient neliniar ( ) și o ușoară deplasare tensiune varistor maximul curbei ~ \u d f (Și) prin tensiune niya la diferite temperaturi zheniya (Fig) max (B = K) Caracteristica curent-tensiune a varistorului, așa cum sa menționat, trebuie să respecte ecuațiile ( ) și ( ) Dacă varistorul funcționează într-un interval îngust de tensiune și curent se modifică, atunci coeficientul de neliniaritate din acest interval poate fi considerat constant: ~= Udì/(IdU)=const Apoi ~dl/I = ~~dU/U; În / = ~ln U +ln A iar caracteristica I-V a varistorului va corespunde ecuației ( ) unde A este un coeficient, a cărui valoare depinde de tipul de variație lateral și pe temperatură Uneori, caracteristicile I-V ale varistoarelor sunt aproximate prin ecuație (,) unde a \u d / ~ și Al \u d A- P \u d A- Folosind ecuațiile ( ) și ( ), rezistența statică Rezistența de tensiune a unui varistor poate fi exprimată în funcție de curent sau tensiune: R(l)=A P- ; ( ) R(U)=A~ul -~ (,) Coeficienții de temperatură de rezistență statică, tensiune și curent În legătură cu neliniaritatea caracteristicilor IV, ar trebui să se facă distincția între coeficienții de temperatură ai rezistenței statice a varistorului, măsurați la tensiune sau curent constant, precum și coeficienții de temperatură ai tensiunii și curentului Din ecuațiile ( ) - ( ), ținând cont de modificarea de temperatură a coeficienților A și Al, se obține: flR TKRln=const = R dT U=consl = = TKAl +c+-l)TK/ln=const; ( ) TKRIJ=const = ~ ~il/=const= = -TKAl + (-)TKUll=const; ( ) D/ TK/lu=const = dt U=const = TKAl ; ( ) di TKUl/=const = UM /-const = TKAl · ( ) La tensiuni joase pe varistor, când coeficientul de neliniaritate ~ = , adică în secțiunea liniară a caracteristicii I-V dAl B TKAl = Td'r= TKRlu, ,,o = -'"T " ( ) Folosind ecuațiile ( ) - ( ), determinăm relația dintre diferiții coeficienți de temperatură ai varistorului: TKRlu=const = fnKRll=const ; TK/ln=corist = -~TKUJl=const Pentru varistoarele produse de industria autohtonă, în intervalul de temperatură de la - la + ° C -TKRln=const = TK/ln=const T (vezi §) În legătură cu analogia principiilor de funcționare a comutatoarelor bazate pe semiconductori și termistori amorfi, caracteristica I-V a comutatorului poate fi aproximată prin același sistem de ecuații ( ) și ( ) Diferența dintre mecanismele de acțiune ale comutatoarelor și termistorilor este asociată cu un volum semnificativ mai mic al zonei încălzite din pelicula amorfă a comutatorului - un canal sau un cablu conductiv format în timpul dantelării curente (vezi §) Canalul conductiv apare înainte de trecerea dispozitivului în starea deschisă și, datorită încălzirii, are o conductivitate specifică mai mare decât restul părții pasive a peliculei semiconductoare amorfe Prin urmare, cantitățile incluse în ecuațiile ( ) și ( ) sunt parametrii canalului conductor din pelicula unui semiconductor amorf, adică H este coeficientul de împrăștiere al canalului conductor; T este temperatura canalului conductor; Roo este un coeficient care depinde de aria secțiunii transversale a canalului conductor, de grosimea filmului semiconductor amorf și de proprietățile sale; B este coeficientul de sensibilitate la temperatură al semiconductorului amorf În starea deschisă a comutatorului, adică cu o rezistență scăzută a canalului conductiv, este, de asemenea, necesar să se ia în considerare rezistența la răspândire în substratul de grafit

sub canalul conductiv Astfel, cu rezistența specifică a grafitului Q = , Ω-cm și raza secțiunii transversale a canalului conductor r = μm, se calculează rezistența la răspândire Rs în substratul de grafit ne conform formulei ( ), este de ohmi O astfel de rezistență poate afecta în mod semnificativ caracteristica I-V a comutatorului în stare deschisă Luând în considerare căderea de tensiune pe rezistența de împrăștiere, caracteristica I-V a comutatorului trebuie să corespundă ecuației U = YHRoo(T-To)exp ~ + Rsl Rezultatele unui calcul numeric folosind această ecuație arată că valorile curentului și temperaturii canalului conductiv la tensiunea minimă pe comutator în stare deschisă depind în mare măsură de valoarea rezistenței de răspândire în grafit substrat De exemplu, fără a lua în considerare rezistența de răspândire, valorile calculate ale curentului și temperaturii la tensiunea minimă se dovedesc a fi mA și, respectiv, K, ceea ce este nerealist și nu corespunde valorilor experimentale Luând în considerare rezistența de răspândire (Rs \u d Ohm), aceleași valori sunt egale cu , mA și K ceea ce este destul de acceptabil În calculele din acest exemplu, se presupune B = K HR "" \u d , - Ohm W k- Conductivitatea specifică a canalului conductiv încălzit depășește conductivitatea specifică a restului părții pasive a amorfului film semiconductor Cu toate acestea, aria secțiunii transversale a canalului conductor este cu câteva ordine de mărime mai mică decât aria părții pasive a filmului semiconductor amorf dintre electrozi Prin urmare, conductivitatea totală a părții pasive a filmului poate fi mai mare decât valoarea absolută a caracteristicii de conductivitate diferențială a secțiunii de tranziție a CVC a canalului conductor În acest caz, comutatorul va avea așa-numitul CVC în formă de Y (vezi §) Astfel, comutatoarele bazate pe semiconductori amorfi pot avea caracteristici curent-tensiune în formă de y, care la prima vedere contrazic mecanismul de comutare termică Secțiunea de tranziție a CVC-ului în formă de y nu poate fi investigată experimental punct cu punct, chiar și atunci când se folosește un generator de curent ideal ca sursă de energie, adică o sursă de energie cu o autorezistență infinit de mare Caracteristici și proprietăți Tensiunea de comutare este tensiunea minimă la care comutatorul trece de la starea închisă la cea deschisă Pentru diferite comutatoare bazate pe semiconductori amorfi, tensiunea de comutare variază de la unități la zeci de volți Tensiunea de comutare a comutatoarelor pe semiconductori amorfi scade odată cu creșterea temperaturii ambiante, la fel ca și tensiunea de defalcare în timpul defecțiunii termice (vezi §) Cu toate acestea, la comutatoarele cu o grosime mică a peliculei semiconductoare amorfe (mai mulți micrometri), o defalcare a avalanșei poate precede defectarea termică din cauza intensității ridicate a câmpului electric Tensiunea de avarie în timpul avalanșei crește odată cu creșterea temperaturii ambientale (vezi §) Prin urmare, comutatoarele cu o grosime mică de film de semiconductor amorf pot avea o dependență complexă a tensiunii de comutare de temperatură Cu toate acestea, mecanismul de comutare de la starea închisă la starea deschisă este asociat doar cu defalcarea termică Curentul de rupere este curentul minim la care întrerupătorul este încă deschis Când comutatorul este acționat la tensiune alternativă sau în modul pulsat, este necesar să se țină cont de inerția procesului de încălzire și răcire a canalului conductor Curentul prin comutator, în funcție de temperatura conductorului ! To) și, în același timp, cu o temperatură mai mare de topire sau de înmuiere , cu o componentă ionică mai mică a conductibilității Caracteristicile pozitive ale dispozitivelor bazate pe semiconductori amorfi sunt ușurința lor de

fabricare și rezistența ridicată la radiațiile penetrante Control)! întrebare! De ce și în ce condiții IerekL T, ~ Econ - unghiul Hall Să luăm acum în considerare efectul magnetorezistiv din punct de vedere cantitativ în condiții optime, adică pentru un semiconductor nelimitat Abaterea traiectoriei de deplasare dar-Fig Modificarea duratelor de încărcare din direcția căii libere externe a câmpului electric într-un purtător de sarcină nelimitat (găuri) de-a lungul vectorului semiconductorului electric este echivalentă cu o scădere a câmpului în semiconductor - lungimea căii libere a purtătorilor în câmp, situat în seria magnetică în direcția câmpului electric nit câmp la pe L \u d - ' \u d - cos q:\u e, unde / o este lungimea liberului calea purtătorilor de sarcină în absența unui câmp magnetic; /' - proiecția traseului parcurs de purtătorul de sarcină între două ciocniri succesive (cale liberă) în prezența unui câmp magnetic, în direcția unui câmp electric extern (Fig) Pentru câmpuri magnetice mici și, în consecință, pentru valori mici ale unghiului Hall q:>, puteți utiliza expansiunea într-o serie: Apoi J L ~lo-Lo+ loq:> / Folosind ( ) , obținem L ~ (/o/)c Deoarece pe parcursul drumului liber purtătorul de sarcină parcurge o cale mai scurtă de-a lungul câmpului electric E în prezența unui câmp magnetic, aceasta este echivalentă cu o scădere a vitezei de derivă și a mobilității și, în consecință, a conductivității semiconductorului Modificarea relativă a rezistivității în acest caz (Q-Qo)/Qo=(yo-y)/yo=L/ o=ts / (,) Pentru un cristal semiconductor limitat în dimensiune, se utilizează de obicei relația L L), tensiunea directă aplicată diodei este distribuită între joncțiunea pn și rezistența bazei diodei: Unp = Up η +/npRo Rezistența bazei diodei crește într-un câmp magnetic transversal ca urmare a scăderii mobilității purtătorilor de sarcină majoritari și minori, ca într-un magnetorezistor convențional O creștere a rezistenței de bază a unei diode cu o bază groasă poate fi asociată și cu o scădere a duratei de viață a purtătorilor minoritari, dacă, datorită curburii traiectoriei de mișcare, purtătorii minoritari ajung la suprafața regiunii de bază, unde lor rata de recombinare este mare Ca urmare a creșterii rezistenței de bază, tensiunea directă aplicată unei diode cu o bază groasă este redistribuită: proporția de tensiune pe tranziție p-n scade Acest proces duce la o scădere bruscă a curentului care trece prin diodă, deci modul în care acest curent este legat exponențial de tensiunea de la joncțiunea pn În plus, curentul care trece prin joncțiunea pn scade din cauza scăderii curentului de saturație, ca în cazul unei diode cu bază subțire Astfel, o diodă cu o bază groasă poate fi utilizată ca magnetodiodă cu o alegere adecvată a dimensiunilor geometrice ale bazei diodei și a parametrilor electrici ai materialului sursă De obicei, magnetodiodele sunt realizate cu o grosime de bază corespunzătoare mai multor lungimi de difuzie ale purtătorilor minoritari, adică o grosime de câțiva milimetri Materialul semiconductor al bazei, precum și pentru magnetore- \u d zistori, trebuie să aibă o mobilitate ridicată a purtătorilor de sarcină [cm relatia ( )] Aceste cerințe sunt îndeplinite de germaniu și siliciu Ramuri directe ale VAC ale germaniului magnetodioda in campuri magnetice cu diferite inducție magnetică sunt prezentate în fig Pentru a evalua sensibilitatea magnetodiodei la câmpul magnetic, prin analogie cu convertorul- mi Hall, folosește un chuv-Fig Ramuri drepte BACH diodă magnetică cu germaniu, valabilitate situat în câmpuri magnetice cu diferite y magnetice \u d LI / (V /), inducție unde LI este modificarea tensiunii pe magnetodiodă atunci când este introdusă într-un câmp magnetic Sensibilitatea la volți a magnetodiodelor poate fi

semnificativ mai mare decât sensibilitatea la volți a convertoarelor Ho IIla din același material Magnetotranzistoare bipolare Un magnetotranzistor este un tranzistor care folosește dependența caracteristicilor și parametrilor săi de un câmp magnetic De obicei, tranzistoarele bipolare sunt insensibile la un câmp magnetic, deoarece un câmp magnetic transversal duce doar la o curbură a traiectoriilor purtătorilor de sarcină minoritari care trec prin bază de la emițător la colector, ceea ce este echivalent cu o scădere a mobilității efective f în purtători minoritari în baza tranzistorului Datorită grosimii mici a bazei în tranzistoarele bipolare convenționale, aproape toți purtătorii injectați de emițător ajung la colector, în ciuda curburii traiectoriilor lor de către câmpul magnetic Un alt motiv fizic pentru modificarea parametrilor tranzistoare bipolare de șanț în mag- Fig Structura câmpului de filament bipolar este un magnetotranzistor modificat cu două rezistențe de bază a tranzistorului colectorii si schema includerii lui măsurători Pentru a crește sensibilitatea la un câmp magnetic, magnetotranzistoarele bipolare sunt realizate cu două joncțiuni colectoare (Fig) Fără câmp magnetic, jumătate din purtătorii de sarcină injectați cad pe , în colector, jumătate pe cealaltă Câmpul magnetic deviază purtătorii de la un colector la altul Prin modificarea curenților primului și celui de-al doilea colector, se poate estima sau măsura inducerea magnetică a câmpului magnetic transversal folosind pentru aceasta, de exemplu, un fel de circuit de punte (Fig) Magnetotranzistoarele bipolare din domeniul câmpurilor magnetice slabe pot avea o sensibilitate magnetică care este cu câteva ordine de mărime mai mare decât sensibilitatea magnetică a traductoarelor Hall controlează problemele noi Ce este efectul Hall? Ce este unghiul Hall și de ce depinde acesta? Care este efectul magnetorezistiv? De ce sensibilitatea nolton a traductoarelor Hall, realizat dintr-un material cu o mobilitate mare a purtătorului, uneori se dovedește a fi mai mică decât sensibilitatea la tensiune a acelorași convertoare dintr-un material cu o mobilitate mai mică a purtătorului Ce design ar trebui să aibă magnetorezistorii? Ce diode pot fi folosite ca diode magnetice? Ce este un magnetotranzistor bipolar? CONCLUZIE În concluzie, remarcăm câteva perspective de dezvoltare a dispozitivelor semiconductoare, precum și probleme care trebuie rezolvate pentru dezvoltarea cu succes a electronicii semiconductoare Una dintre cele mai importante sarcini ale electronicii semiconductoare este creșterea frecvențelor de operare, creșterea vitezei dispozitivelor semiconductoare, inclusiv a circuitelor integrate S-au făcut progrese semnificative în această direcție: frecvența maximă de generare a tranzistoarelor bipolare a crescut cu câteva ordine de mărime în mai bine de treizeci de ani de la apariția primelor tranzistoare de joncțiune și a ajuns la GHz Valoarea acestui parametru al tranzistoarelor bipolare cu microunde este deja aproape de limita teoretică Să enumerăm limitările fizice fundamentale care determină limita teoretică de viteză a diferitelor dispozitive semiconductoare Prima dintre acestea este caracterul finit al timpului de relaxare a sarcinii, adică timpul pentru stabilirea neutralității electrice a diferitelor părți ale structurii unui dispozitiv semiconductor Timpul de relaxare t=eeo -potențial, unghi, defazare X - Coeficientul Hall w - frecvența unghiulară Următoarele denumiri sunt utilizate în figuri: - zona libera (banda de conducere) -banda de valență -electroni oooh - găuri -ioni (sarcini fixe) e e - flux de fotoni (radiație optică, absorbție, interacțiune) -generator de tensiune - generator de curent -@ SIMBOLULE GRAFICE CONDIȚIONATE ALE DISPOZITIVELOR PRINCIPALE SEMICONDUCTORE ÎN SCHEME Dioda Dioda Schottky

Dioda Zener (dioda redresoare de avalansa) Dioda Zener cu doi anozi dioda tunel diodă inversată Varicap Tranzistor bipolar tip p-n-p ° Tranzistor bipolar tip p-p-p tranzistor unijunction n-bază Diodă tiristor Diodă tiristor conducând în sens invers direcţie Diodă tiristor simetric Tiristor triodă controlat prin anod Tiristor triodă cu control catod Triodă tiristor simetric Tranzistor cu efect de câmp cu o tranziție de control casa și canalul p Tranzistor cu efect de câmp cu o tranziție de control casa n canalul r Tranzistor cu efect de câmp de poartă izolată îmbogățit (cu canal p indus și canal p) Tranzistor cu efect de câmp cu poartă izolată de tip epuizat (cu încorporat p-canal și p-canal) dioda emitatoare fotorezistor Fotodiodă Fototranzistor tip p-n-p fototiristor Fotocelula solar fotovoltaic Dimensiunile (în milimetri) ale denumirilor grafice convenționale ale dispozitivelor semiconductoare în conformitate cu GOST - (ST SEV -) pot avea următoarele valori: AaBbcDdR CONSTANTE FIZICE UNIVERSALE Constanta lui Planck h~ , - J-s = , - eV-s Constanta lui Boltzmann k~ , - J/K= , - eV/K Masa de repaus a unui electron m~ Ί - kg= - g Sarcina electronului (sarcina elementara) q ~ · - C Constanta electrica eo ~ , - F/m = , - F/cm Constanta magnetica μθ~ , - H/m = , - H/cm Viteza luminii in vid c~ - m/s= - cm/s INDEX SUBIECTULUI Indexul subiectelor include termenii și conceptele principale găsite în manual Alături de termen sunt indicate doar acele pagini în care puteți găsi o definiție sau interpretare a acestui termen, precum și informații care explică semnificația acestuia Termenii formați dintr-un adjectiv și un substantiv sunt plasați în indexul subiectului în cele mai multe cazuri cu inversare, adică substantivul este luat ca cuvânt principal Cu toate acestea, unii termeni folosiți în literatura tehnică, de obicei fără inversare (de exemplu, "tranziție electron-gaură"), sunt enumerați de două ori în indexul alfabetic Parte activă a bazei tranzistorului Modul activ al tranzistorului , Receptor Baterie nucleară Element electric nuclear Baza dispozitivului semiconductor , , , Capacitatea barieră a joncțiunii pn Tranzistor fără deriva Recombinare neradiativă Tranzistor bipolar - cu diodă Schottky Unitate redresor - semiconductor termoelectric Stare de suprafață a bolometrului semiconductor Banda de valență Varicap Varistor Picior termoelement Vizibilitate Interstițial ionic Defecțiune bruscă Durata de viață a purtătorilor de sarcină neechilibrați, , Trecerea purtătorilor de sarcină minoritari prin baza diodei - Purtători de sarcină minoritar prin baza tranzistorului , Defalcare secundară a tranzistorului Recombinare forțată Redresor cu seleniu Bloc semiconductor redresor dioda coloana Semiconductor degenerat Nivel ridicat de injecție în baza diodei - în baza tranzistorului Înălțimea barierei de potențial p-n- tranziție Generator Gunn -cuantic optic -cu acumulare limitată de sarcină în spațiu - termoelectric Generare curent Generare purtători de sarcină -lumină - termică Heterojoncțiune circuit integrat hibrid Tranzistor orizontal Frecvența de tăiere a raportului de transfer al curentului de bază a tranzistorului Diodă Zener cu doi anozi Nivel de energie de demarcație Diac Diodă redresoare Gunn detector impuls emisie infraroșu avalanșă avalanșă inversată comutare planar semiconductor , semiconductor , semiconductor , ascuțit recuperarea rezistenței inverse amestecare cu o bază groasă cu o bază subțire punct tunel frecvență Schottky zgomot Dinistor Disc Corbino Lungimea difuziei colectorul tranzistorului emițătorul tranzistorului emițătorul , Rezistența de difuzie a bazei tranzistorului , -câmp electric Condensator de difuzie -joncțiune pn - rezistor Difuzia purtătorilor de sarcină Lungimea difuziei -cale liberă a purtătorului de încărcare-da Partea de jos a zonei de energie permisă

Donator Deriva purtător Tranzistor de deriva Zgomot de împușcare
Joncțiune orificiu Legea acțiunii în masă Banda interzisă Poarta FET
Banda de valență interzisă impuritate conducție permisă liberă energie
Concentrație excesivă de purtători de sarcină Zgomot excesiv
Recombinare radiativă Emițător semiconductor Film electroluminiscent
Pulbere Implantarea ionică Diodă cu impulsuri Inversarea populației a
nivelurilor de energie Comutarea inversă a unui tranzistor Indicator de
semn de semiconductor Injecție purtător minoritar Microcircuit integrat
analog hibrid logic optoelectronic semiconductor digital Diodă
emițătoare de infraroșu Ionizare șoc Implantarea ionică Inserție de
ioni Sursă FET Canal FET -conducție de suprafață Defecțiune
catastrofală , Catodoluminiscență Nivel cvasi-Fermi pentru electroni
(găuri) Eficiența cuantică a generației de purtători Colector Joncțiune
colector FET-uri complementare Componentă circuit integrat Conversie pn
joncțiune Condensator de difuzie - MIS - peliculă Contact metal-
semiconductor - metalurgic - semiconductori cu un singur tip de
conductivitate electrică Diferența de potențial de contact Concentrație
de purtător de sarcină în exces dezechilibru - echilibru - - propriu
Dispozitiv de conversie corpusculară Coeficient de rectificare -difuzie
-multiplicare avalanșă neliniaritate , - Peltier - transfer de curent
al bazei modelului teoretic unidimensional al tranzistorului modelul
cal al tranzistorului transfer termo-EMF ionizare impact amplificare
fotorezistor Hall zgomot , -normalizat Panta caracteristicii
tranzistorului cu efect de camp , Dioda avalansa Dioda avalansa Laser
semiconductor Recombinare liniară Capcană de captare - recombinare ,
Luminescență J\\agnitodiode Efect magnetorezistiv , Magnetorezistor
Magnetotranzistor Frecvența maximă de generare a tranzistorului Masa
efectivă a purtătorului de sarcină , Condensator MIS Structura MIS
Tranzistor MIS cu canal indus , , cu canal încorporat , Stare lentă a
suprafeței Recombinare interzonă Structură mesa Contact metalurgic
Circuit integrat analog hibrid logic optoelectronic semiconductor
electronic -digital Model de tranzistor unidimensional teoretic Diodă
de modulare a rezistenței de bază<! , , MOSFET Set de diode Tensiune
inversă înainte Acumularea epitaxială Curentul inițial al colectorului
Emițător O Semiconductor nedegenerat Recombinare directă Transfer
indirect de electroni Concentrație de purtător de sarcină neechilibrată
Joncțiune p-n asimetrică Nivel normal de pornire a injecției a
tranzistorului Cifra de zgomot normalizată Stratul de epuizare Stratul
bogat Direcția inversă pentru joncțiunea p-n Tensiune inversă Curentul
colector invers -emițător Dioda inversă Model de tranzistor teoretic
unidimensional Unijuncție , tranzistor , joncțiune ohm Generator
cuantic optic Optocupler Circuit integrat optoelectronic Dispozitiv
semiconductor optoelectronic Eșec brusc catastrofal , treptat
condiționat , Parte pasivă a bazei tranzistorului Comutator
semiconductor amorf Diodă de comutare Joncțiune ohmică , , - gaură-
găură Schottky - electron direct - indirect electric electron-hole
difuzie colector conversie dezechilibrat neted planar ascutit simetric
aliaj emitator epitaxial -electronic-electronic Parte periferică a
bazei tranzistorului CCD (dispozitiv cuplat la sarcină) Placă de
contact Densitatea ambalării Recombinarea suprafeței , Stare de
suprafață rapidă lent Tranzistor de încărcare la suprafață Defalcarea
suprafeței joncțiunii pn Absorbția fotonilor purtători de sarcină -
impuritate - intrinseci Mobilitatea purtătorilor de sarcină Pozistor
Indicele de absorbție Tranzistor cu efect de câmp - cu poartă izolată -
cu tranziție de control Câmp electric de difuzie Semiconductor
degenerat impuritate proprie compensată nedegenerată p-tip -p-tip

Microcircuit integrat cu semiconductor -termopilă -scală Dispozitiv termoelectric semiconductor Bolometru semiconductor dispozitiv galvano-magnetic diodă indicator semn emițător element de învățare!:'nt laser dispozitiv de afișare a informațiilor dispozitiv cuplat la sarcină - receptor de radiații - receptor de radiații penetrante diodă emițătoare de lumină diodă zener pompă de căldură , tone! :'unitate pmoelectrica fotodioda fotocelula frigider , ecran Defecțiune treptată Plafonul zonei permisive Frecvența limită a raportului de transfer al curentului de bază Transfer al curentului emițătorului - Traductor Hall Instrument semiconductor de afișare a informațiilor - semiconductor optoelectronic - cuplat la sarcină Receptor de radiații semiconductor Zona de impurități Semiconductor de impurități Tensiunea de rupere a diodei Avarie a diodei Avalanșă suprafața prin defecte - tunelul transistor Conductivitate specifică Înainte direcția pentru joncțiunea pn - tensiune Joncțiunea electronică directă Funcția de lucru a electronilor Concentrația de echilibru a electronilor (găuri) Diferența de potențial de contact "Încălzirea" purtătorilor de sarcină Zona de energie permisă Modul de funcționare a tranzistorului activ , , -saturație , , - cutoff , , Rezistor de difuzie - film Joncțiune p-n ascuțită Curent de recombinare Recombinare neradiativă forțată radiativă liniară interbandă directă de suprafață , spontană spontană stimulată cu participarea capcanelor de recombinare , Dioda semiconductoare cu microunde , Generarea de lumină a purtătorilor de sarcină Diodă emițătoare de lumină (LED) Zona liberă (energie) Dioda cu microunde Tiristor simetric Semiconductor compensat Viteza de recombinare a suprafeței - recombinare la tranziție ohmică - decombinată -invers Amestecare diodă semiconductoare Închiderea joncțiunilor tranzistorului Concentrarea proprie a purtătorilor de sarcină Semiconductor propriu Raportul Einstein Rezistența bazei de difuzie a tranzistorului , volumetric , colector , saturație tranzistor joncțiune ohmică joncțiune ohmică specifică răspândire specific stratului emițător , Joncțiune termocuplu Joncțiune p-n fuzionată Diodă Zener - node - - Baza tranzistorului cu raportul de transfer al curentului static - curent emițător tranzistor Grad de integrare Dren FET Pol redresor semiconductor Generarea termică a purtătorilor de sarcină Defalcarea termică a unei diode Zgomotul termic Termistor - încălzire indirectă - încălzire directă Termopilă semiconductoare Diodă zener compensată termic Termistor Termoelectromotor Termoelectromotor Termoelectroelectro Termoelectric tiristor dioda - conducătoare în sens opus - cu o joncțiune emițător șuntat - simetrică - triodă Generare curent colector inițial saturație recombinare emițător inițial Dioda punctuala Tranzistor bipolar fara deriva lateral orizontala cu dioda Schottky deriva integrala mezaplanar multicolector planar aliat epitaxial planar suprafata izolata cu un singur camp junction poarta cu un canal indus , cu canal încorporat , cu joncțiune de control Triac Trinistor Tunnelul purtătorilor de sarcină Dioda tunel -defalcarea joncțiunii pn Unghi Hall Ionizare impact Conductivitatea semiconductorului Rezistivitatea joncțiunii ohmice stratul Ecuația de continuitate -Poisson -curent Nivel de injecție ridicat scăzut mediu Nivel de demarcație energetică capcane de captare - capcană de recombinare , - suprafața Fermi Condiție de avarie avalanșă joncțiune pn Condiție de neutralitate electrică Defecțiune condiționată , Circuit echivalent fizic al unui tranzistor , Circuit echivalent formal al unui tranzistor Fotodiodă Fotoluminiscență Efect fotorezistiv Fotorezistor Fototiristor Fototranzistor Fotocelulă Frigider cu semiconductor , Dioda de frecventa Baza tranzistorului activa pasiva periferic Band gap

Scala semiconductoare Raport de zgomot Dioda U!um Zgomot termic shot - exces Dember EMF , Ecran semiconductor Extragerea purtătorilor de sarcină Joncțiune electrică Emițătoare de film electroluminesc Electroluminescență Joncțiune electron-gaură Joncțiune electron-electronic Element electric atomic Element emițător semiconductor -microcircuit integrat -memorie pe un semiconductor amorf Emițător Emițător p-p-joncțiunea joncțiunea p-p - nivelul de captare a energiei zona -capcana de recombinare Energie de ionizare donator (acceptor) afinitate electronică Creștere epitaxială Joncțiune p-n epitaxială Efect Gunn Gauss Seebeck magnetorezistiv , Pe Ltje Extensii de bază a tranzistorului fotorezistiv Masa purtătoare de încărcare Hall efectivă , Eficiența generației cuantice colector emițător CUPRINS

Tranzistoare cu efect de câmp și dispozitive cuplate la sarcină § Redresoare cu seleniu § Diode cu impulsuri § Diode Schottky § Diode de recuperare rapidă rezistență inversă § Diode cu microunde § Diode Zener § Stabistori § Diode de zgomot § Diode cu avalanșă § Diode tunel § Diode inversate § Varicaps § Fiabilitatea diodelor § Structura și moduri de bază de funcționare § Distribuția fluxurilor staționare purtători de sarcină kov § Distribuția purtătorilor de taxe § Curenți continui cu reactivă ~me ~ § Fenomene în tranzistoare cu durere curenți mari § Parametri statici O § Defalcarea tranzistoarelor § Caracteristici statice § Funcționarea tranzistorului pe un semnal variabil mic § Parametrii cu semnal mic § Circuite echivalente § Circuit echivalent al modelului teoretic unidimensional § Capacitate de joncțiune de barieră și rezistență de bază § Răspuns în frecvență § Funcționarea tranzistorului pe impulsuri (§ Zgomot în tranzistori § Tehnologia de fabricație și con- Structura tranzistoarelor bipolare § Tranzistoare unijunction § Fiabilitatea tranzistorului § Diode tiristoare § Tiristor cu diodă manevrată joncțiunea emițătorului § Tiristoare cu triodă § Tiristoare conducând în sens opus § tiristoare simetrice § Modalități de control al tiristoarelor § Tehnologia de proiectare și fabricare a tiristoarelor § Tranzistoare cu efect de câmp cu control intersecția § Calculul static de ieșire caracteristica tranzistorului cu efect de câmp cu tranziție de control § Circuite echivalente de câmp tranzistor de control mutarea Capitolul circuite integrate Capitolul Dispozitive semiconductoare bazate pe efectul tranziției interlobilor electronilor Capitolul Dispozitive semiconductoare optoelectronice Capitolul Termistori Capitolul Varistoare § Proprietățile de frecvență ale trans- termistori cu tranziție de control § Tranzistoare cu efect de câmp cu poartă izolată § Calculul caracteristicilor statice de ieșire ale unui tranzistor cu efect de câmp cu poarta izolata § Parametrii și proprietățile câmpului tranzistoare cu izolate creativ § Dispozitive semiconductoare cuplate la sarcină § Varietăți de dispozitive cuplate la încărcare § Sarcini și principii ale microelectronicii § Clasificare microcircuite integrate § Metode de izolare a elementelor circuitelor integrate § Elemente active § Elemente pasive § Principiul de funcționare al generatoarelor Gunn § Tehnologia de fabricare a generatoarelor Gunn § Parametrii și proprietățile generatoarelor Gann § Generatoare cu acumulare limitată de încărcare spațială § Clasificarea dispozitivelor semiconductoare o ptoelectronice § Dispozitive semiconductoare pentru afișarea informațiilor și infraroșu diode emitatoare § pulbere electroluminiscentă- emițători mari § Film electroluminiscent emițători § Lasere § Fotorezistente § Fotodiode § Fotocelule semiconductoare § Fototranzistoare și fototiristoare § Receptoare de radiații penetrante și dispozitive de conversie corpusculară § Optocuple și dispozitive optoelectronice chipsuri § Termistoare încălzite direct § Bolometre § Termistori de încălzire indirectă § Pozitori § Principiul de funcționare al varistoarelor cu carbură de siliciu § Caracteristici § Varistoare din semiconductori de oxid Capitolul § Pornește dispozitive semiconductoare amorfe conductoare pe amorfe § Elemente de memorie bazate pe semiconductori amorfi § Fiabilitatea, stabilitatea și durata de viață a dispozitivelor bazate pe semiconductori amorfi Cap § Design și funcționare Semiconductor § Generatoare termoelectrice termoelectric § Frigidere si pompe de caldura aparate Capitolul § Principiul de funcționare Semiconductor § Traductoare Hall galvanoma~-filament § Magnetorezistoare dispozitive § Magnetodiode și magnetotranzistori Concluzie Lista lecturilor recomandate Denumirile principalelor

cantități adoptate în cartea Denumiri grafice condiționate ale principalelor dispozitive semiconductoare din circuite Constante fizice universale Index EDIȚIE EDUCAȚIONALĂ Pasynkov Vladimir Vasilievici, Chirkin Lev Konstantinovich DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE Cap editat de V I Trefilov Editor I G Volkova Redactori juniori I A Isaeva, I A Titova Copertă cartonată de artistul VV Garbuzov Editor de artă T M Skvortsova Editor tehnic N V Ya: shukova Corector G I Kostrikova IB nr Ed Nr ER-Predată în platou Semnat pentru a apăsa / / T- Format X / Bum carte-jurnal Căști marca temporală Imprimare de birou Volumul conv p l + , arb p l forz , arb kr -ott , ed l + , ed l forz Tiraj de exemplare Zach Nr Pret p ~ O Editura "Vysshaya Shkola", , Moscova, GSP- , str Neglinnaya, / I: Roslavsky Polygraph Combine Soyuzpoligrafprom sub Comitetul de Stat al URSS pentru edituri, tipografii și comerț cu cărți , I: Roslavl, st Libertate, / rimel amânat graficul? Ce dispozitive semiconductoare și ce condiții fizice corespund administrator?